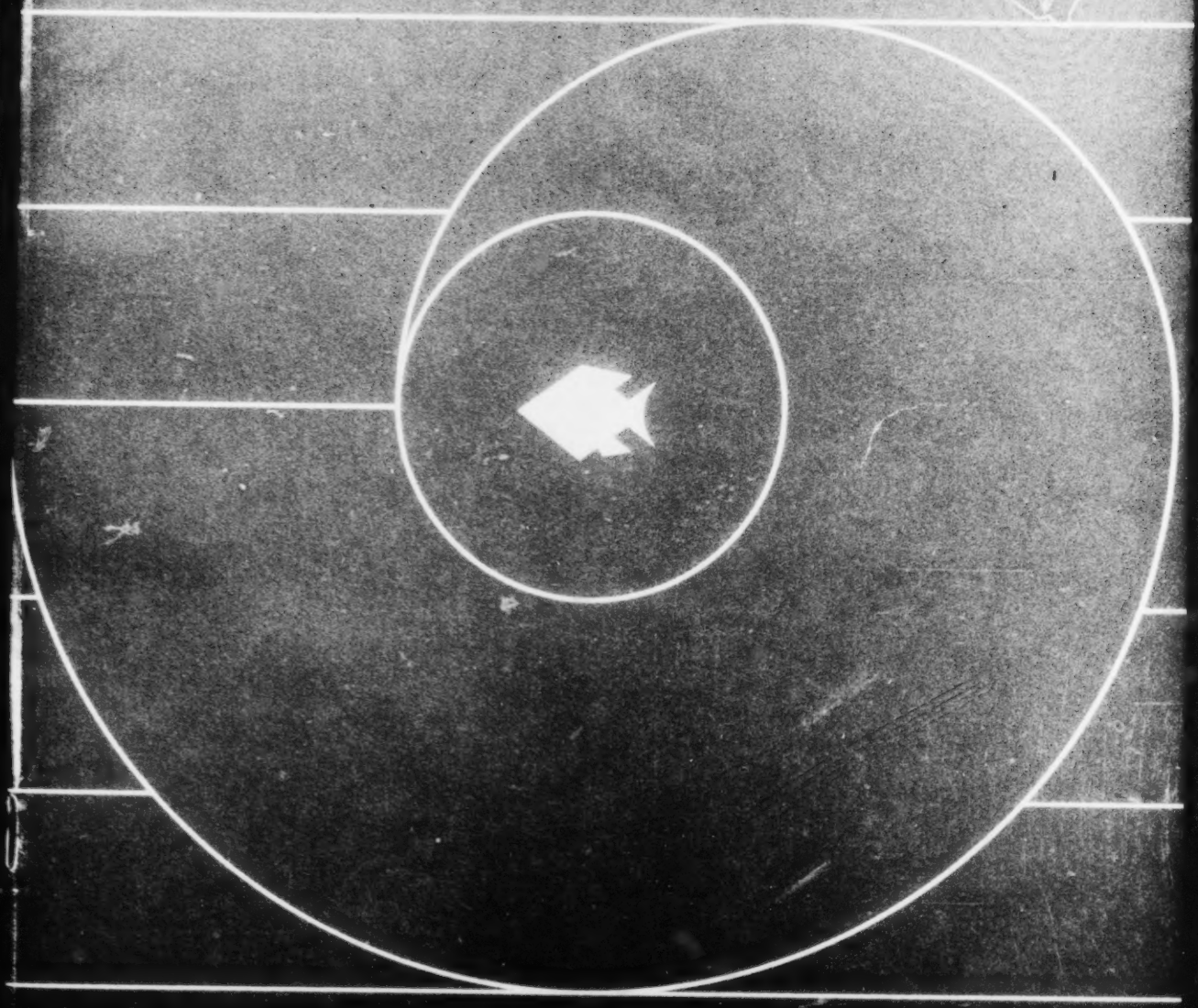
Fisheries Research Board of Canada Reports

Physical Oceanography in Canada

by C.R. Mann



86-03075/

The Fisheries Research Board of Canada Reports series encompasses studies, symposia, and special reports.

Report No. 1 — "The Way Ahead" Symposium on the 75th Anniversary of the Fisheries Research Board of Canada.

Report No. 2 — The Fisheries Research Board of Canada — Seventy-Five Years of Achievements. By W. E. Ricker.

Report No. 3 — Science for Canada's Shelf-Seas Fisheries. By H. A. Regier and F. D. McCracken.

Report No. 4 — Biological Oceanography in Canada: A Perspective and Review. By T. R. Parsons.

Report No. 5 — Natura Naturans: A Symposium on the Fry Paradigm.

Report No. 6 — Structured Aquaculture Development with a Canadian Perspective. By G. I. Pritchard.

Report No. 7 — Science for the Scattered Fisheries of the Canadian Interior. By H. A. Regier.

Published by

Environment Canada
Fisheries and Marine Service

Publié par

Environnement Canada
Service des pêches et des sciences de la mer

Office of the Editor *Bureau du Rédacteur*
116 Lisgar, Ottawa K1A 0H3

Catalogue No. Fs97-10/8
Price: Canada: $3.00 Other countries: $3.60
ISBN 0-660-00531-X
Price subject to change without notice.
Printed by Donald F. Runge Limited, Pembroke, Ont., Canada.
Contract 02KT.KF801-6-0375

FRB REPORT

Physical Oceanography in Canada[1,2]

C. R. MANN

Atlantic Oceanographic Laboratory, Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, N.S. B2Y 4A2

Contents

2 ABSTRACT/RÉSUMÉ

2 INTRODUCTION

2 OCEANS, ESTUARIES, FJORDS, AND AN ARCHIPELAGO
Three oceans
Fjords and estuaries
An archipelago

5 USES OF PHYSICAL OCEANOGRAPHIC KNOWLEDGE
Transport
The fisheries
Oil and mineral resources
Environmental quality
Weather and climate
Other uses

8 RESEARCH
Tides, tsunamis, storm surges, and waves
Tides
Tsunamis
Storm surges
Surface waves
Dynamics and circulation
Small-scale phenomena
The coastal zone
The oceans and the waters of the continental shelves
The Canadian arctic archipelago and Arctic Ocean
Oceans and atmosphere
Physical oceanography and biology

19 OCEANOGRAPHIC SERVICES

20 CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS
Basic research
Applied oceanography
Costs
Recommendations

23 ACKNOWLEDGMENTS

[1] Reprinted from the *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 1976, 33(6): 1411–1433.

[2] This report was prepared under contract for the Fisheries Research Board of Canada. The views expressed are those of the author and not necessarily those of the Board.

Abstract

MANN, C. R. 1976. Physical oceanography in Canada. FRB Report No. 8: 1–23.

The basic research program in physical oceanography in Canada is described. The use of physical oceanographic information in resource development, environmental assessment, prediction of climate, and other marine activities is examined. A major finding of the study is that the use of physical oceanographic information has increased and will continue to do so. Basic research in fisheries oceanography, ocean climatology, and numerical modeling is inadequate. Recommendations are formulated to improve basic research and services.

Accepted March 15, 1976

Résumé

MANN, C. R. 1976. Océanographie physique au Canada. Rapport de l'ORP No. 8: 1–23.

L'auteur décrit le programme de recherches fondamentales en océanographie physique au Canada. Il examine l'emploi des renseignements en océanographie physique dans le développement des ressources, l'évaluation de l'environnement, la prédiction du climat et autres activités marines. Une constation majeure découlant de l'étude est que l'utilisation des renseignements en océanographie physique a augmenté et continuera d'augmenter. La recherche fondamentale en océanographie des pêches, en climatologie des océans et en développement de modèles numériques est inadéquate. L'auteur fait des recommandations visant à améliorer la recherche et les services de base.

Accepté le 15 mars 1976

Introduction

The object of this study is to assess the effectiveness and adequacy of the Canadian program in physical oceanography and to recommend improvements, bearing in mind its potential value to the management of resources, both living and nonliving.

The study has been limited to oceans, coastal waters, bays, estuaries, and fjords. Inland waterways and river systems are excluded. Also excluded is research into the properties of sea ice, and sedimentary processes and other geological phenomena. These have been considered only insofar as information about the water sphere is necessary to understand them.

Throughout the first half of this century knowledge of the physics of oceans was slowly built up by a relatively small number of scientists using observational techniques that were devised at the end of the 19th century. This was the period of exploration and mapping of the major ocean currents and the water masses of the oceans, which were characterized by their temperature and salinity, and of early studies of currents in channels and the physical characteristics of inlets. The tools of the physical oceanographer were the reversing thermometer for the measurement of temperature, the "water bottle" used to take samples of water at depth for measurements of salinity, and the current meter which gave current speed and direction. Current meters could not be used extensively because it was not easy to moor them and obtain lengthy records of the currents. Almost all knowledge of ocean currents came from interpretation of the temperature and salinity fields using dynamical theory relating the fields of temperature and salinity to steady state currents. During the 1950s and at the beginning of the 1960s, more sophisticated techniques employing new technological advances began to influence the exploration of the oceans. The new techniques allowed more accurate determination of salinity, measurement of thermal microstructure, and the mooring of meters that gave long records of currents. The world's fleet of oceanographic ships increased at a fast rate and their deployment has almost completed the mapping of the major steady state features of the oceans. Given this background the physicist began to study changes that take place in the ocean and the interactions of the ocean with the atmosphere and to investigate small-scale phenomena. The observations also enabled considerable progress to be made in application of the principles of fluid mechanics to ocean dynamics and development of theory has progressed at a fast pace. It is within the context of this accelerating surge of knowledge that this study has been undertaken.

Oceans, Estuaries, Fjords, and an Archipelago

THREE OCEANS

Canada borders three oceans, the Atlantic, Pacific, and Arctic. The currents and water masses of these oceans have a great influence on weather and climate, and on the oceanographic

conditions that prevail over the continental shelves and in the inlets and channels of the coast.

Canada's western coast borders the northeastern extremity of the North Pacific, by far the largest of the world's oceans. The major current of the North Pacific, the Kuroshio, flows north on the western side of the ocean past Japan, then turns east and broadens into a slow movement of oceanic water toward the coast of North America. About 500 km west of the Washington–Oregon coast the slow movement divides, one part turns south to flow along the Californian coast and the other turns north toward the west coast of Canada. Near the coast the surface waters are diluted by freshwater runoff from the coastal mountains. The influence of the runoff on the salinity of these surface waters extends over the continental shelf to more than 500 km seaward of the shelf edge. Within the time scale of months to a year, the oceanographic conditions of the west coast seem to be largely dominated by local interactions with the atmosphere. The fresh surface layer moves offshore in summer, replenished by spring drainage of fresh water from the mainland mountains and driven by prevalent northwesterly winds which force the surface water to the west. In winter, the stress of southeasterly winds, created by the development of a low pressure area over the northern part of the North Pacific, forces the fresh surface waters in against the coast. The transport of oceanic water is also determined by the wind field of the northeast Pacific which not only influences the transport in surface layers but also the transport of the deeper water. As there are no strong currents, year-to-year changes in the annual variation in the temperature of the upper layer seems to be controlled by local exchange of heat with the atmosphere and only secondarily by advection of heat on an ocean scale.

Traditionally, oceanographers have regarded the Pacific as a quiet ocean in comparison with the Atlantic but recent studies have turned up evidence that the currents along the western seaboard are more complex than has been believed. The occurrence of relative maxima and minima in the temperature field along a line to Weather Station Papa is thought to be related to the presence of local currents or eddies in the general northerly flow along the Canadian coast. There is also evidence of a permanent or semipermament eddy lying to the northwest of the Queen Charlotte Islands. The description of these features is poor and much needs to be done before the oceanography of the northeast Pacific is fully understood.

In contrast to the northeast Pacific, the oceanography of the northwest Atlantic, which borders Canada's east coast, is dominated by the strong boundary currents found on the western side of an ocean. Two major currents of the North Atlantic, the Gulf Stream and the Labrador Current, exert a controlling influence on temperatures and salinity along the eastern seaboard; the local runoff and heat exchange with the atmosphere play a secondary role. The Gulf Stream flows northeast 200 km or more seaward of the edge of the continental shelf, past Nova Scotia and Newfoundland, then turns east to cross the Atlantic. Warm, saline water from the Stream floods onto the Scotian Shelf and the southern edge of the Grand Banks, and moves into the Gulf of St. Lawrence through the Laurentian Channel. The Labrador Current has its origins in the Baffin Island Current and East Greenland Current and brings cold and relatively low salinity water south along the Labrador coast to flood the Grand Banks. The cold water moves into the Gulf of St. Lawrence and onto the Scotian Shelf above the water from the Atlantic. Intense mixing between the cold Labrador Current and the warm Gulf Stream waters creates complicated and variable temperature and salinity patterns along the edge of the continental shelf where it is not unusual to find surface temperatures changing by 8 C in a few kilometers. The cold southerly flow of arctic water causes severe ice conditions along the eastern coast. All coastal waters north of Cape Breton and the Gulf of St. Lawrence are ice covered in winter, and remnants of the winter ice of the Gulf are often brought as far south as Halifax by a southerly current. Along the Labrador coast icebergs are carried south by the Labrador Current into the shipping lanes southeast of Newfoundland.

The deep ocean east of Canada is also dominated by strong deep currents: Deep water that has descended to the depths through cooling and overturning in the Norwegian Sea spills over the ridges between Greenland and Scotland, and flows south in the Atlantic as a deep western boundary current. Identifiable water from the current can be found in the South Pacific as far east as New Zealand, having travelled the length of the Atlantic Ocean then east around Antarctica.

Canada's northern coast borders the Arctic Ocean, the smallest of the world's oceans and the most poorly studied. The ocean is almost landlocked and has the unique feature of a perennial surface cover of pack ice. In summer, ice recedes from the coast of Alaska and mainland Canada, giving a short navigation season. The most north-

erly edge of the Canadian archipelago is icebound year-round. A major feature of the ocean is the surface layer of relatively low salinity water created by runoff from Canada and the USSR. The fresh surface layer lies on top of more salty water which has entered from the Atlantic through the Norwegian Sea. The sharp increase in density at the lower surface of the upper layer limits deep convection and exchange of heat with the warmer deep water. The limitation of the heat exchange with the deep water is a condition for maintenance of the polar pack. Little is known about the currents of the ocean except that the general circulation is clockwise. The circulation causes a southward and westward current along the northwestern shore of the arctic archipelago and the western part of the mainland north coast.

Fjords and Estuaries

Along the Canadian coast are hundreds of inlets whose oceanography is determined by the morphology of the inlet, river runoff, the local climate, and the prevailing oceanographic conditions at the entrance. Some inlets are classified as estuaries and the circulation of the water in the inlet is strongly influenced by a large runoff of fresh water from the land. Some fall into the category of fjords, deep inlets with a sill at their entrance, which controls exchange of the deep water in the inlet with ocean water at the mouth. Others are just bays with no distinguishing sill and not particularly influenced by runoff but still with their own characteristic pattern of currents determined by their shape, tides, and local winds.

The western coastline is the most finely detailed. The mainland coast and the coast of Vancouver Island are indented by numerous long, narrow, and deep inlets opening into the sea at one end and often with a river at the other. There are 57 with a length of more than 18 km. The inlets are deep, some more than 600 m, and most have sills of various depths giving them the morphological character of a fjord. The circulation and water characteristics are mainly determined by freshwater runoff which, varying with the season, causes a seasonal change in the properties in the upper layer. Exchange of deep water with the sea occurs only irregularly. Along the mainland coast are numerous islands. Between the islands and the mainland is a complex set of waterways, used substantially by shipping and sustaining important commercial fisheries. The oceanographic processes in these channels are complex and are dominated by estuarine and tidal processes. Currents are very strong; in the shallow Seymour Narrows, for example, the tidal currents attain speeds of 14 knots. The tides cause the water in the inside passages to oscillate to and fro, which, with the turbulence generated by the currents, leads to complicated mixing processes.

Two major geographic features on the east coast are the Bay of Fundy and the Gulf of St. Lawrence. Fundy is one of the few systems in the world where the natural period of oscillation of the Bay and shelf is close to the tidal period. The waters in Minas Basin in the upper reaches of the Bay respond to the tides and the water level rises and falls over 13 m. The strong tidal currents also lead to considerable mixing. The Gulf approaches a small sea in area and has its own special problems. It is partly estuarine because of the discharge of the St. Lawrence, but wind, heat transfer, tides and tidal currents play important dynamic roles in determining the circulation. The smaller inlets found along the east coast have their individual current systems. The influence of runoff on their oceanography is often not large and their current patterns and flushing characteristics are determined by wind conditions and ocean conditions at their entrance. The inlets along the Labrador coast and Baffin Island are mostly unexplored oceanographically.

An Archipelago

Bordering the Arctic Ocean and stretching southeast to the most northerly reaches of the Atlantic, lies the system of channels and islands that forms the Canadian archipelago. This archipelago is unique. The channels are deep with remarkably steep sides, and for most of the year are icebound.

There are 16 major passages that range in width from 10 to 20 km and in depth from a few tens of meters to over 700 m. Water from the Arctic Ocean moves east into the archipelago. The surface layer flows east to Baffin Bay but the deeper water is blocked by shoaling of the channels in the central archipelago. The deep water in the channels east of the sills comes from Baffin Bay. The temperature and salinity distributions in the channels have been described in the summer but there are few winter measurements. The inlets of the islands have their own peculiar features, with flushing occurring within a short period of the summer. Apart from a general description of the currents and characteristic temperatures and salinities, details of the oceanography of the archipelago are largely unknown, and it is only in recent years that studies have been made of the characteristics of the inlets and currents in the channels.

To the south of the archipelago, Hudson Bay

forms a shallow inland sea with an area of 520,000 km². Knowledge of the oceanography of the Bay is rudimentary. Freshwater drainage from the Canadian Shield gives the Bay the character of an estuary. It is generally believed that the circulation is clockwise, and that deep water is replenished by water from Hudson Strait or Foxe Basin.

Uses of Physical Oceanographic Knowledge

The most widely used knowledge of the oceans is our knowledge of the tides. The time and height of the rise and fall of the sea surface along coastlines and in bays and harbors can be predicted very accurately, and tide tables are published for all parts of the world. It is the ability to predict the tides that has led to universal use of the information by all users of the sea. The prediction of other physical aspects of the sea, e.g. changes in the currents and temperatures over a fishing ground, is mostly beyond our grasp at the present time. Some predictive services are being developed in Canada, notably of waves and sea ice, and where they reach a reasonable degree of reliability they are finding extensive use. There is no reason to believe that we cannot predict other physical characteristics of the seas. Some, such as the development of eddies in a mean flow, may be sufficiently random in occurrence that they cannot be forecast. The future of our ability to predict rests with the effort that is put into understanding the physics of the oceans.

The knowledge that is used most extensively at the present time can be broadly divided into two categories. One is climatic information, by which we mean the average and extreme conditions prevailing over several years. The other is detailed information on the oceanography of local areas. The user interested in climatic information is totally dependent on the extent of past knowledge which has been obtained before his problem emerged. The extent to which he can find an immediate satisfactory answer depends on the current state of knowledge.

Climatic information is used in the design of equipment for use at sea and may be used to calculate stresses and strains in the design of structures or to assess operational use. A good example of the latter application of knowledge was the development of the Canadian Variable Depth Sonar System in the 1950s which was designed to operate and take advantage of the sound channels found in the North Atlantic at depths of 50–100 m. The sound channels are created by temperature inversions. The design of the sonar system was based on an assessment of the depth at which these inversions occurred, on average, and on an assessment of the areas of the North Atlantic where the sound channels occurred and the sonar would be effective. The assessments were made from a study of historical temperature data.

In many cases the historical data is not sufficiently detailed or does not exist, particularly if the strength and direction of currents is sought, and it is then necessary to run a survey program to collect the necessary data. The practical problems which arise in inlets and channels almost invariably fall into this category. The number of short-term studies undertaken by the Federal laboratories and universities in response to requests for information have increased dramatically in the past few years. Most requirements originate with concern for pollution and the state of the environment, fisheries, and transportation. Most are concerned with problems in inlets, channels, and the near-coastal sea.

Transport

The factors that have made oceanographic information considerably more important in the field of transportation than in the past are: increased technical sophistication of the transport system with associated escalation in costs, and construction of elements of transportation systems that are a departure from the traditional harbor–surface vessel system.

The increased technical sophistication of the harbor-surface vessel system has led to an increased cost and made it worthwhile for the operators to seek information about the design and operation of the systems. A current study is that of the design of a new ferry service from North Sydney to Port aux Basques, Newfoundland, by the Ministry of Transport. The factors entering the design of the system are wave and current information for the design of port facilities, and estimates of the time the ferry cannot operate because of wave and ice conditions. The latter influences the design of the ship and schedules. The construction of offshore terminals for the berthing of large tankers, the design of submersibles or semisubmersibles to transport oil from the arctic, and the construction of pipelines on the seafloor are examples of new concepts in transportation where a knowledge of the wave conditions, ocean currents, sea temperatures, the movement and disposition of sediments, and other parameters influence the design of the system.

The forecast of oceanographic conditions has not historically played a substantial role in the conduct of transport operations at sea. How-

ever, transoceanic shipping has been transformed in the past decade and operators are concerned with fast passage times, fast turnaround times, tight schedules which are required to mate with land transportation, and security of cargo. The forecasting of water levels at ports, ocean currents, and wave conditions is of increasing value to shipping interests and, where these services exist, they are being used. The most highly developed forecasting service in Canada, other than tidal forecast, is the forecast of ice conditions in the St. Lawrence, along the Labrador coast, and in the arctic by Ice Central (DOE). The service includes a prognostication of the time of freeze-up and of breakup of the winter ice.

The Fisheries

Historically, it has been the fisheries biologist who most often wanted physical oceanographic information to develop the fisheries. The dependence of marine life on physical conditions in the ocean was recognized at the beginning of the development of ocean science, and since then there has been a continual effort, by the countries of the world with an interest in fisheries, to understand the relationships between the biology and the physics of the ocean. The size of marine life ranges from the smallest of life forms, the plankton, less than millimeters in length, to the great whales which attain lengths of tens of meters. The existence, abundance, and distribution of marine life is influenced by all the physical characteristics of the ocean that we know about: light in the upper layers which is necessary for primary production; the density, temperature, and salinity in which a species has evolved; currents which determine the drift of fish eggs and larvae; and processes of upwelling, turbulence convection, and internal waves which bring nutrient-rich water into the surface layers.

The interactions are complex, and the temporal and spatial scales of the physical environment that the marine biologist seeks to have described range from hours to years, and meters to hundreds of kilometers. At the smaller scales the biologist is concerned with patchiness and fluctuations in the plankton population and their relationship to availability of plankton as food for the larger fish. This leads to studies of the diffusion rate of these smallest elements of the food chain and its dependence on the turbulence and turbidity of the environment. In inlets, to which a great deal of attention has been paid in recent years, the concern is often with the effects of pollutants entering the inlet from the land, or with experimental programs designed to find out why a particular fishery, such as oysters, has declined. These programs require a description of larger-scale features such as the flushing characteristics of the inlet, and the changes in oceanography of the inlet that occur over a period of years. In a more direct application of fisheries, the biologist has sought to determine the relationship of abundance of species to changes in ocean conditions such as temperature and salinity, or to utilize prevailing oceanographic conditions to direct the operation of fishing fleets. Here the biologist needs a description and, ideally, a prediction of changes in ocean current systems, of currents and temperatures over spawning grounds, and the movement of oceanic fronts.

Another aspect of the dependence of marine life on its environment with which we are increasingly concerned is the changes in the ocean environment caused by man. At present we have succeeded in changing conditions only in places like inlets, harbors, and narrow straits, often with disastrous consequences for the biology of the local area, although the biologists are becoming increasingly concerned and aware that the impact may be more widespread. We are, though, setting our sights on weather modification, making substantial changes to the runoff of continents, and other large-scale projects. We know enough to understand that such manipulation is going to affect the oceans, and hence the fisheries, but not enough to predict what the changes will be. They could enhance the fisheries in some cases.

Oil and Mineral Resources

The extent to which knowledge of the ocean will be required for exploitation of oil and mineral resources of the seabed cannot be readily assessed, as the development of these resources is in the early exploratory stages. The development of a transportation system for oil and control of oil pollution are of immediate concern to Canada and are discussed elsewhere in the report. Several problems have arisen at the present exploratory stage which have led to requests for information on ocean currents, and waves and swell. These have been associated with the construction and operation of oil rigs and the movement of ice and icebergs in ice-infested waters. The requirement so far has been to provide information about the continental shelves. A large undiscovered oil and gas potential is believed to exist on the outer continental shelf and slope, drilling is technologically feasible, and exploration in these areas will broaden the area for which the information is sought.

Environmental Quality

Estimating the impact of pollution absorbs a

significant portion of the effort in physical oceanography in Canada and elsewhere. Whether it is disposal of sewage in a bay, escape of oil from tanker disasters, or chemicals contained in a runoff, a knowledge of currents, mixing processes, and diffusion plays a central role in estimating the area and degree of pollution. Some pollution results from pollutants which are first released in the atmosphere and then assimilated into the ocean at the air–sea interface. An assessment of this type of pollution involves air–sea exchange processes.

By far the largest number of pollution problems are arising in coastal inlets due to local concentration of population or industrial installations. Assessment of the dispersion of material in the inlet almost always requires a study of the oceanography of the local area as each inlet has its own pecularities of circulation. These assessments take up a significant portion of the effort devoted to the physical oceanography of the inlets and channels along the Canadian coast. The problems are no longer limited to the southerly coastlines where there is a concentration of population, but now include the channels and bays in the archipelago and along the northern coastline, due to oil and mineral development and power projects such as James Bay. Almost all the coastline is involved with its great variety of oceanographic features.

The necessity of estimating the fate of a pollutant entering the ocean is not limited to the coastal area. The exploration for oil is beginning to give rise to requests to assess the environmental impact of the escape of oil in the waters over the continental shelf, viz. the Beaufort Sea Project, and there has been disposal of highly toxic waste in the deep ocean. We are not in nearly as good a position to assess the fate of the pollutant in the open ocean. The coastal inlet is small; a field program can be undertaken and the characteristic features of the circulation and mixing determined. It is partially within our ability to do a similar assessment in coastal waters, but when it is a question of dispersal in the open ocean the assesment has to be made on the basis of the international pool of knowledge of the oceans.

Weather and Climate

The most challenging prospect facing us today is the possibility of predicting the climate. Success most assuredly will have a tremendous impact on improving and managing the world food supply. It may be that failure to do so will lead to serious food shortages simply because we cannot foresee climatic changes that cause reduction in crops or fisheries. Furthermore, we have arrived at the point where we are changing the climate both deliberately and inadvertently. Deliberate manipulation of climate at present is local, small-scale, and concerned with stimulation of rainfall. There is evidence that inadvertent changes through manipulation of runoff are not so local and permanent changes in climate are occurring. Rivers are the easiest of our natural systems to manipulate, and complete control of the world's runoff is quite feasible for purposes of power generation, agriculture, and flood control. We have reason to believe that this will cause changes in climate. Recent studies have also concluded that if the present rate of growth of energy released to the atmosphere continues, the possibility of global changes in climate in a century or so exists. This is not so distant in the future if we consider the time it will take to carry out the research that will allow us to predict such changes with confidence. Canada is rich in the renewable resources, agriculture and fisheries, that are affected by climatic change, and geographically lies where changes in the oceans can cause significant changes in climate. The presence of the polar pack in the polar ocean is a major factor in the Canadian and world climate, and the oceanographic conditions in the two great estuaries, Hudson Bay and the Gulf of St. Lawrence, influence the climate of eastern Canada.

The present thrust in meteorology is the development of numerical models for weather prediction. The international experiments GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment) carried out in 1974, and the FGGE (First Garp Global Experiment) to be conducted in 1977–78, have been specifically designed to improve and test the models. Because of the nature of the atmosphere, prediction of the weather with the models appears feasible for only 2 or 3 weeks, and for this, a description of the present sea surface temperature is sufficient. For the longer-term studies of climate, account will have to be taken of the changes occurring in the oceans, particularly of the heat content in the upper layers. At the longer time scales of years this means predicting changes in the ocean currents which lead to changes in the atmospheric circulation. Success depends on correctly understanding the ocean–atmosphere interactions and developing some form of combined model that can be used for predictive purposes. The Global Atmospheric Research Program, sponsored by the World Meteorological Association and the International Council of Scientific Unions, is directed to this end. Many oceanographic and meteorological experiments that will be needed to make progress toward an understanding and prediction of cli-

mate will be large-scale and expensive, and it will be impossible for any one nation to carry them out alone. Some will take place in midocean far away from any nation's shores. Canada stands to gain a great deal by their success and as a country with a well-developed program in physical oceanography, it should expect to contribute in a major way.

Other Uses

To varying degrees, physical oceanography is used in defense, recreation, and energy development. The temperature and salinity conditions of the ocean determine the success of detection of submarines by sonic techniques and it was the description of the refractive conditions caused by temperature conditions off Canada's east coast that led to the development of the Canadian variable depth sonar system that I described earlier. For operational purposes the navy operates oceanographic services which provide 3-day forecasts of the temperature conditions in the upper layers.

The oceans have massive quantities of energy and various schemes have been put forward to tap them. The use of tidal power is a reality in France and a possibility in the Bay of Fundy. Such projects involve dams or some other form of modification of current systems. The modifications must be clearly understood at the design stages if success of the operation is to be assured, and the modification to local water levels and currents estimated. For the Fundy power project measures of tidal rise and fall on the continental shelf, far from the proposed power dams, will be necessary before the resulting changes in tidal heights in the Bay can be determined. Schemes such as harnessing the energy of the Gulf Stream are not attractive at the present, but we cannot discard the possibility that the energy in oceans will be tapped in the future. The energy might be obtained without the problems of pollution that arise from burning fossil fuels, or through the disposal of radioactive material from reactors, but the oceans will be modified to some extent and in a way that could be either to our advantage or disadvantage.

Research

A compilation of the physical oceanographers in Canada has been made for 1974 by the Secretary of the Canadian Committee of Oceanography. The compilation lists 86 scientists involved in physical oceanography in 23 institutions. Universities account for 20 and government agencies for 66. Of the 23 institutions, there are 4 with a staff of more than 5. These are Bedford Institute of Oceanography, 23; Ocean and Aquatic Sciences, Pacific, 18; Ocean and Aquatic Sciences, Ottawa, 14; and Institute of Oceanography, University of British Columbia, 7. These 4 institutions account for 62 of the 86 oceanographers in the country and reflect the buildup of oceanographers on the two coasts in the decade, 1963–73, and the establishment of the Canadian Oceanographic Data Centre (now expanded to the Marine Environmental Data Service) in Ottawa.

During visits to the institutions an assessment was made of the activity on which the individual spends most of his time in the long term. It is as follows:

Activity	Number of individuals
Surface waves and wave forecasting	4
Tides and tidal current	6
Air–sea interaction	4
Small-scale processes (Turbulence, internal waves, and thermal microstructure)	10
Numerical modelling	3
Dynamics and currents of the deep sea	10
Dynamics and currents of the continental shelf	0
Dynamics and currents of inlets and channels (Includes the Gulf of St. Lawrence and Strait of Georgia)	21
Dynamics and currents of the arctic	9
Data services (Ottawa) and synoptic forecasts (Pacific and Atlantic)	7
Administration and staff studies	12

Some oceanographers are involved in more than one of the above activities; however, the numbers do reflect the attention being paid to the various aspects of the program.

Tides, Tsunamis, Storm Surges, and Waves

Tides — The tidal rise and fall of sea level in bays and harbors has been observed since the earliest times because of its influence on all activities along the shore. In modern times it is taken into account in the design of port facilities for oceangoing ships, in the operation of pleasure craft, in fishing operations, and in many other activities. The time of high and low water can be predicted accurately as the major tide generating forces, the gravitational attraction of the moon and sun, are periodic. The time of high and low water at different places along a coast depends on the geometry of the coast and cannot be computed with precision from the tidal oscillations in the ocean basin because of the complexity of

coastlines. However, gauges to measure the elevation of the sea surface are readily installed where tidal predictions are required. The local tidal height can then be resolved into periodic components related to the movement of the sun and moon, and tidal heights predicted well into the future. In Canada the observations are made by the Hydrographic Service and the Marine Environmental Data Service (MEDS) at 130 permanent tide gauge stations. Analysis of the records is the responsibility of MEDS which also publishes daily tidal prediction tables for selected reference ports, and weekly and monthly bulletins of water levels in the St. Lawrence River system. In places where permanent gauges are not maintained tidal prediction can readily be made from observations at temporary gauge sites.

The rise and fall of the sea surface is the consequence of tidal currents which are not easily observed and vary considerably with the shape of the coast. In narrow channels the currents can be high, a factor to be taken into account by shipping. In inlets the flushing characteristics are often determined by the tidal regime and this controls the rate at which a pollutant in the bay is dispersed to the open sea. The tidal currents also give rise to mixing of the water in a bay which can be vigorous; they play a dominant role in mixing in the Bay of Fundy and in the Strait of Georgia. In fact the physical oceanography of both seems to be dominated by the tidal regime.

Tidal theory is not sufficiently complete that the propagation of tides into a bay and the resulting tidal currents can be predicted without accompanying field observations. Such predictions are of importance when the geometry of the bay or channel is altered by a dam or causeway. The changes in the tidal currents and water levels can be estimated by constructing small-scale hydraulic models but the problems of scaling limit the success and applicability of this type of model, particularly when the Coriolis force due to the earth's rotation cannot be neglected. Numerical modeling of the tidal regime offers promise of much better prediction but the models will need more development and the development will have to be supported by an adequate field program to determine water levels and currents. In the case of the Bay of Fundy, measurements of tidal heights on the continental shelf outside the Bay are necessary before the changes in the tidal regime due to the proposed power project can be predicted.

The major gap in the basic knowledge of tides is the understanding of tides of the deep ocean. Gauges which can be set on the floor of the deep ocean have only recently been developed and deployed to make the necessary observations, and in Europe and the United States progress is being made with the development of numerical models of ocean tides. The problem is too large for any one nation to solve and an international effort will be required.

Studies of tides developed early in the history of oceanography in Europe and the United States but developed slowly in Canada until 1960. Research on tides in Canada was stimulated by the development, in the 1960s, of numerical prediction of tidal heights and the production of tide tables for the Canadian coast by the Marine Sciences Branch of the Department of Mines and Technical Surveys (now Ocean and Aquatic Sciences, Department of the Environment). Prior to this time, the prediction had been done by the Tidal Institute, Liverpool, England. Tidal research is carried out at Dalhousie University on the east coast, at the Marine Environmental Data Service in Ottawa, by the Ocean and Aquatic Sciences, Pacific Region, and at the University of British Columbia on the west coast. At Dalhousie, the emphasis is on the theory and numerical modelling of tides in gulfs and the forcing of such tides. Field studies of tidal currents are carried out in collaboration with the Atlantic Oceanographic Laboratory. The most recent work has been to develop a numerical model of tidal and residual currents in Minas Basin with observations of the currents in the Basin. The numerical models are in the early stage of development; they are not yet predictive models which can be applied to calculating the effect of barrages on the current system and need further development. Research in Ottawa has been mainly associated with the development of techniques for analysis of tidal records and prediction of tides. Studies have also been made of the tides in James Bay and the possibility of developing tidal power in Ungava Bay. The dominant effect of tidal forcing on the current systems in the Strait of Georgia and Hectare Strait has led to concentration on numerical models of tidal currents in straits in the west coast program. A numerical modeling group has been established by the Pacific Region, Ocean and Aquatic Sciences with a field program of sea level and current measurements.

The total research in tides has developed to a modest level of effort by competent scientists. The research is split between the coasts and Ottawa instead of being concentrated in one institute which is seen to be an advantage rather than a disadvantage. The tidal prediction service for the country and the research required to develop the predictive techniques for the service

is done centrally, leaving the programs on the coasts free to develop according to the local type of tidal problem. Not a great deal of attention is given to tides on the continental shelves. The tides could play an important role in the physical processes on the edges of the shelves through conversion of tidal energy to internal waves (internal tides), and the study of tides should be expanded to include such phenomena. There does not seem to be any reason for Canada to develop studies of deep-sea tides; but such studies, particularly the observations of deep-sea tides, need to be carried forward through international cooperation and we should be prepared to participate whenever possible, even if only at the level of providing ship time to place deep-sea tide gauges.

Tsunamis — Tsunamis and storm surges are transient oscillations of the sea surface that can result in unusually high water at shorelines and cause extensive damage due to flooding.

Tsunamis or "tidal waves" are created by earthquakes or volcanic eruptions on the seafloor. They propagate across the ocean basin as a series of crests moving at high speed. The Unimak tsunami consisted of a series of crests 61 cm high and 195.2 km apart moving at a speed above 640 km per h. As the water shoals at the coast the wave height increases. The crests of the Unimak tsunami reached 16.8 m in Hawaii and flooding caused extensive property damage and loss of life. The effects of tsunamis are felt on both coasts of Canada. The tsunami from the Alaskan earthquake of 1964, swept south along the coast of British Columbia into the coastal passages and fjords. The waves crested above high water and flooded built-up areas causing damage estimated at $3 million. The severity and frequency of tsunamis in the Pacific have engendered considerable research into the characteristics of their propagation across the ocean and the response of coastal inlets to the approaching wave. Research on tsunamis is coordinated by a Tsunami Committee of the International Union of Geodesy and Geophysics. Also a series of tide gauges have been linked around the Pacific into a system to detect the occurrence of a tsunami and provide warning of its approach. Liaison between the participating countries and exchange of information on observing methods and techniques is effected by the Intergovernmental Oceanographic Commission, and an International Tsunami Information Centre is run by the United States. Canada contributes to the system with telemetering tide gauges at Tofino and Langara inlets. Theoretical studies are carried out by MEDS and the Atmospheric Environmental Service (AES) as a combined program, particularly studies of the response of inlets to the tsunami.

The warning system was developed in the Pacific because of the frequence of tsunamis there; five major tsunamis have been recorded since 1945. They also can occur on the Atlantic coast where, though infrequent, they can be severe. The submarine earthquake south of Newfoundland in 1929, created a tsunami that swept along the southern coast of Newfoundland with the loss of 21 lives and great property damage.

Canadian research is of good quality and a reasonable level. The contribution of Canadian scientists to international studies should be encouraged to continue. The warning system and associated research is one of the best examples in oceanography of what can be done by nations to solve a common problem.

Storm surges — Storm surges are caused by the action of severe winds and air pressure anomalies. The resulting rise in sea level at the coast can last a day or more and be sufficient to cause severe flooding. The European countries have, for some time, been concerned with studies of surges and the prediction of surges as the surge is a continuing threat to the low country bordering the coastline of many of the countries. The effect of surges is not as dramatic along the Canadian coast, but in view of the development of hydroelectric power in places such as James Bay and other coastal development, there is reason to undertake research on surge phenomena and methods of predicting surges from forecast meteorological conditions. At the present time AES and the Ocean and Aquatic Sciences, Pacific Region, are developing numerical models and methods for storm surge prediction in the Beaufort Sea; AES and MEDS have undertaken theoretical studies of storm surges in Hudson Bay and other places on the coast. More attention may have to be paid to this area of research in the future.

Surface waves — The provision of wave information and research into the formation of waves is a part of the Canadian oceanographic program that has developed at remarkable speed in the past 5 years. So have requests for wave information. The Marine Environmental Data Service has taken a leading role in providing the information and an assessment of the uses to which the information is being put, and the size of the requirement for wave data can be obtained by examining the requests they have received.

In the 9 months, October 1973 to June 1974, MEDS received about 60 requests for wave data (excluding lakes). Thirty-one of these gave the reasons which break down as follows:

Design of shoreline structures:	
Harbors	5
Small craft harbors	5
Ship design and operations (ferries, ships, hovercraft, etc.)	5
Design and operation of offshore structures (oil rigs, wellheads, Open sea terminals)	7
Research on wave characteristics	6

Marine Environmental Data Service is mostly concerned with providing climatological data on waves, i.e. the average and extreme conditions in an area, for use in the design of structures, routes, and schedules. In addition, forecasts of wave conditions in Gulf of St. Lawrence and along the Atlantic seaboard are provided by Canadian Forces Meteorological and Oceanographic Center (CF-METOC), Atlantic, located in Halifax for use by the Navy, commercial shipping, and fishing vessels.

The MEDS operations, which began in 1969, evolved from a joint study with the Department of Public Works, with the object of establishing a set of wave rider buoys along the coast to measure wave period and height, and of obtaining climatological data on the wave conditions along the seaboard. Having acquired equipment to measure waves and an ability to assess wave conditions, MEDS was soon involved in many short-term projects to assess wave conditions for specific purposes. The number has increased steadily and is still increasing. At present, MEDS continues with this service and has also established 25 stations as part of the longer-term wave climate study along the east and west coasts. Three of the stations are on oil rigs and drilling ships. Surface waves can also be estimated from surface winds. The technique is not satisfactory in harbors and small water bodies but can be applied in the open ocean. A project to develop hindcasting methods and establish wave climate conditions from the wind field is being studied by AES in collaboration with MEDS which is developing a monthly wave climate for the northwest Atlantic. Because of changes in the year-to-year wind and wave conditions, it will be several years before the estimates become reliable and they will need to be checked with field measurements.

The real time wave forecasts for the northwest Atlantic provided by CF-METOC Atlantic are based on a forecast of hemispherical conditions, by the United States Fleet Numerical Weather Center, Monterey, Calif., and on sea and swell reports from shipping. From these two, METOC prepares a forecast up to 36 h. The service is new and the techniques need proving, as sea and swell reports from the ships are mostly visual with the errors inherent in this type of observation, and techniques of forecasting wave from the wind field are far from perfect.

The forecasting of waves depends on the accuracy of the predicted wind field and techniques used for forecasting. The physics of the development of a wave field under the action of wind is not yet completely understood so there is opportunity to improve the forecasts by improving meteorological forecasts and by further studies of wave generation. Studies of wave generation and of statistical properties of waves are carried out at the Atlantic Oceanographic Laboratory in collaboration with scientists of other countries. An international experiment, the Joint North Sea Wave Experiment (JONSWAP), has been organized with the objective of improving wave prediction techniques and the Atlantic Oceanographic Laboratory contributes to the experiments. The experiment, or more properly series of experiments, is another example of the usefulness of international cooperation in solving a problem common to all countries and providing techniques that can be used by the individual country to provide services.

Dynamics and Circulation

The dynamic systems of oceans, channels, and inlets are comprised of motions that range in scale from a few centimeters to thousands of kilometers. At the larger scales are the wind-driven gyres of the ocean basins and the thermohaline circulation of the oceans, with spatial scales of thousands of kilometers and time scales of years to centuries. At the shorter scales of centimeters to meters and seconds to hours lie turbulence, internal waves, and other types of small-scale motion.

Progress has accelerated in the last decade in describing these motions with modern instrumentation. There is still a great deal of work to be done before the physics of the interactions between the different scales are understood and the motions and their interactions described sufficiently well mathematically to allow prediction.

Small-scale phenomena — Turbulence, internal waves, thermal microstructure, and other small-scale processes are susceptible to study by individual scientists or small teams given adequate instrumentation support. Currently research is

carried out at the Institute of Oceanography, University of British Columbia; Ocean and Aquatic Sciences, Pacific Region; and Defence Research Establishment, Pacific, all on the west coast; and the Atlantic Oceanographic Laboratory on the east coast. The program developed from early work at the Institute of Oceanography, University of British Columbia, and the Pacific Naval Laboratory (now DREP), and has consistently been of the first caliber and recognized internationally.

These small-scale processes are the mechanisms by which heat exchanged with the atmosphere is distributed through the upper layer of the ocean, and by which pollutants are dispersed. An understanding of them is central to prediction of changes in climate and of importance in estimating the levels of pollution arising from pollutants entering the oceans. Some effects of small-scale processes are just being recognized, particularly those processes that influence marine life, where studies such as the relationship between the phytoplankton, turbulence, and thermal microstructure are not much further than the exploratory stage.

Relative to other parts of Canada's oceanographic program, research on small-scale processes is reasonably well developed. The processes are difficult to describe experimentally and theoretically and to make progress in this field it is essential that Canada maintain a research program of the quality that exists at present. For the future the main requirement is to ensure that the work continues at the same level of competence.

The coastal zone — Research into the dynamics and physical characteristics of inlets and channels along the coast is the most highly developed aspect of the Canadian oceanographic program and commands the attention of roughly one-half the Canadian effort. This level is understandable. It is in these areas that we are building causeways and breakwaters that alter the patterns of currents, where the effects of pollutants entering the ocean are noticeable and sometimes disastrous to the local marine life, and where information on currents, waves, and tides is needed for design of shoreline structures.

The morphological features of most inlets found on the east and west coasts are known. Many have been visited, particularly on the west coast, and at least a rudimentary description of the temperature and salinity in the inlet exists. The driving forces of the circulation and the type of current pattern and flushing that occurs in the inlets and channels are understood in a general sense but not well enough to describe conditions within a particular inlet without a field study. Each inlet and channel has its own features depending on shape, bottom topography, local winds, runoff, and the characteristics of the ocean at its entrance. On both coasts work has progressed in classifying the inlets according to their general characteristics and in studying some inlets and channels intensely. However, there is still much experimental and theoretical work to be done before the changes in the oceanography of inlets and channels resulting from changes in meteorological and ocean conditions and from man-made structures are fully understood. I will comment on the inlets and channels of the arctic later.

The four largest semienclosed bodies of water on the coasts are the Gulf of St. Lawrence and Hudson Bay on the east coast and the Strait of Georgia and Hecate Strait systems on the west coast. These are large bodies of water. They will require intensive study if they are to be described in sufficient detail to provide the type of information needed to manage the fisheries or the degree of pollution in their waters. They are of sufficient size that a study of them is more of the nature of an investigation of a small sea than an investigation of an inlet or channel. Research in the Strait of Georgia and the St. Lawrence has been carried on for many years and has reached the point where the oceanographers feel they can attempt large-scale studies of the major features of the circulation in a program that includes both theory and experiment. The benefits of such studies are clear. Both areas are heavily utilized for fisheries and transportation and are immediately accessible to pollution and need to be managed. Also both areas are large enough, but not too large, that an attempt to study dynamics at a modestly large scale, including boundary effects, can be successful, and the knowledge gained of great value. Proposals for both projects have been put forward and have recently been given Cabinet approval. Hudson Bay has received very little attention. Knowledge of its temperature and salinity characteristics are based on summer data and of its currents on some early drift bottle work in summer. This may have been acceptable in the past but industry has moved north and there are large power developments on its shores (James Bay) which change the runoff. The effects on local ecology and on the oceanographic characteristics could be significant. If there are changes in the physical oceanography of the Bay, some change in climate will result as the Bay is sufficiently large that changes in the heat exchange with the atmosphere are significant.

Regrettably, modification of the runoff is progressing without a great deal of effort to describe the characteristics of the oceanography, and to provide a set of baseline data that can be used to determine the changes that the modifications have made.

An aspect of coastal oceanography that has not received much attention in Canada is the action of waves and currents on the shoreline. A research program directed toward an understanding of the processes involved could easily command a substantial effort. The program would need to encompass work on marine sedimentation, on the movement of sands and gravel by the water motions, and on studies of the wave and current systems that are set up at the shoreline. The laws of sediment transport need further development. Some work could be done in laboratory models, but this would need to be extended to carefully planned observations of sediment movement in nature. Work also needs to be done on the longshore currents that derive their energy from surface waves, internal waves, etc., and this would involve field programs designed to aid our understanding of the basic physics of the currents. Work of this type is carried out by individual scientists at different laboratories in Canada but does not amount to a highly developed program. The newly formed Institut national de la recherche scientifique océanologie, Université du Québec, à Rimouski has plans to develop a program of studies of shoreline processes. Sedimentary processes are of importance not only along the shoreline. The ocean basins are sedimentary basins and the gently rising gradient from the abyssal floor to the continental slope is a sedimentary feature. The foraminifera in the sediments are historical records of the oceans' characteristics more than a few hundred years ago, records which, if they can be interpreted, could allow a better understanding of large-scale climatic features such as ice ages. It is possible that the processes of marine sedimentation should command a much more substantial research program from the point of view of coastal and deep-sea processes than they now have. The subject should be reviewed from the geological and oceanographic points of view as it has only been dealt with in a cursory manner in this report.

Research into the dynamics and circulation of the waters of coastal zone is at reasonable level in Canada. The problem to be faced is that in the inlets and channels a large demand has arisen for special surveys because of increased utilization of the shoreline, and in support of biological studies. At least one scientist and several technicians are usually involved. Some of the more extensive studies extend over long periods and need more people. The survey of Pendrill Sound on the west coast, which has been undertaken because the entire crop of oyster larvae disappeared in 1971, will, for example, require about 2 years to carry to completion, including the final report, and involve about 10 scientists and technicians. This is a substantial part of the effort of the Ocean and Aquatic Sciences, Pacific Region, in Coastal Oceanography. These surveys are being done at the expense of longer-term studies of processes in the coastal zone which cannot be neglected, and some means should be found to alleviate the situation which can only get worse. One possibility is to develop a capability in industry to do the surveys. In most cases the objectives and requirements of the survey can be spelled out sufficiently clearly, and the time required is short enough that an adequate contract can be written. As many surveys are to provide an immediate answer to a practical problem the survey techniques and analyses can only be those of today, and these can be employed by a competent physical oceanographer with a technical team working in industry. The surveys do not require the large, expensive research ship and the expensive high precision instrumentation required for deep-sea work.

The oceans and the waters of the continental shelves — Research into the dynamics of the current systems of ocean basins has advanced rapidly in the past decade. The research is emerging from the stage when cruises to study the currents and related phenomena were largely exploratory. The major features of the ocean currents have been mapped from the temperature and salinity distributions and some progress has been made in describing smaller-scale features, such as eddies buried in the mean flow, counter currents, and the characteristics of upwelling areas. Buoy systems capable of carrying current meters were developed in the early 1960s at the same time as graduates from schools of oceanography set up in the 1950s began to have an impact on oceanographic research. The graduates are well-versed in fluid mechanics, the tools are available to set out arrays of sensors in the ocean, and deep-sea oceanography is gradually moving into an era of deliberate experiments set up to study some dynamic feature of the current system.

Canada's major studies of ocean circulation are carried out at the Atlantic Oceanographic Laboratory, Bedford Institute, and have been mainly devoted to theoretical and experimental work in the North Atlantic. The program is not

large but is of sufficient stature that Canada makes a contribution to the experimental and theoretical studies of the oceans. Very little work is done in the Pacific. The imbalance of the effort Canada applies to the large-scale features of the circulation of the Pacific and Atlantic should not cause particular concern at the present time. Studies of ocean circulation are expensive, and require major research ships. The sheer size of the experimental programs involved makes international cooperation essential and at the present and for the foreseeable future the international effort devoted to ocean circulation will mainly concentrate on the North Atlantic. Eventually, however, the Pacific will have to be studied more intensely and in the future Canada will need to be prepared to support a program in the Pacific.

An area of ocean research that is poorly developed in the Canadian program is the application of numerical techniques to problems in circulation. The development of numerical techniques has given oceanographers a powerful new tool that can be used to study and quantify models of the oceans. It is a field that should not be neglected. At present, modeling on the scale of the larger semienclosed bodies such as the Gulf of St. Lawrence proceeds erratically and is done by individual scientists who apply only part of their time to it. Modeling on the scale of oceans is not attempted. Oceanographers are well behind the meteorologist in developing numerical models. For example, Canadian meteorologists have established a group of 15 research scientists in Montreal to develop atmospheric models for weather forecasting. A review of the potential of numerical models has been prepared by Prof S. Pond of the University of British Columbia.[2] Professor Pond concludes that the development of models has sufficient promise that purchase of a computer at $10 million holds as much benefit as purchase of a new research ship. This conclusion is not to be taken lightly. Numerical modeling is weakly developed in Canadian oceanography partly because computational facilities have not been available to scientists who would have moved in this direction. It is not too early for Canada to establish a more substantial program in numerical modeling. The models will be rather crude to begin with but even the crude models serve as a guide to inadequacies in our knowledge of the ocean's basic physics, and to the type of observational network that will be required for descriptive or predictive purposes in the future. A start can be made by establishing a group on the east coast to develop the larger-scale circulation models as part of the observational and theoretical program that already exists. The group would need access to the AES computer in Montreal. They should also establish cooperation with the meteorologists working on similar problems in the atmosphere, as prediction of trends in climate and long-term changes in the ocean will depend on development of an understanding of ocean–atmosphere interactions. These are discussed in a later section.

Peripheral to the major gyres of the oceans are the current systems that operate over and close to the continental shelves. These must respond to changes in the large-scale ocean circulation but there is little progress being made in understanding this response, few attempts to study the details of the currents, and no development of the theory of the dynamics of the continental shelf systems. The latter is probably the most neglected field in oceanography. In Canada the reason is that we have no program on either coast directed at an understanding of the oceanography of the waters over and adjacent to continental shelves. Some work gets done. Observations of the temperature and salinity structure over the continental shelf in the Beaufort Sea were undertaken during the *Hudson* 70 expedition in support of foraminiferal studies. A much more extensive program in the same area is being conducted for environmental assessment studies relating to oil exploration by the Ocean and Aquatic Sciences, Pacific Region. Similar short-lived studies have been carried out over the eastern continental shelf, but nowhere is there a clear thrust of observational and theoretical studies of the continental shelf system. On the banks and along the edges of the continental shelves lie major fisheries and it is in these areas that oil exploration with its attendant risk of oil spills takes place. Any form of assessment and prediction of the impact of environmental changes on fisheries, or of the dispersion of oil spills, requires a much better knowledge of the oceanographic features than we have now. The lack of effort devoted to studies of the currents and other physical processes such as internal tides and long wave response which occur on the shelves is a major gap in the Canadian program.

The Canadian arctic archipelago and Arctic Ocean — Until recently knowledge of the oceanographic features of the channels and inlets of the archipelago was limited to distributions of temperature and salinity built up from observations from icebreakers in the archipelago and ice islands in the polar ocean. These are sufficient

[2]Pond, S. 1976. Numerical modeling of ocean circulations. J. Fish. Res. Board Can. 33: 1434–1450.

to give a reasonably good description of the gross features of the temperature and salinity characteristics of the archipelago and polar ocean. The current systems have been mostly estimated by geostrophic calculation from the temperature and salinity data. There are some direct current observations, but they are relatively few.

In the Arctic Ocean, the data and techniques give a gross picture of the circulation, but there are few observations that tell us anything about the smaller-scale features, such as eddies. By contrast it is known that eddies with scales of several hundred kilometers exist in the Atlantic, and work on the features has progressed to the point where the role of eddies in the energetics of the general circulation is being studied both theoretically and in the field with large groups of current meters. All that is known about the Arctic Ocean is that observations from ice islands, by American scientists, indicate that eddies or eddy-like features exist. Exchange of water with the Pacific is through the Bering Strait. The Strait is shallow and the exchange is limited. Exchange with the Atlantic occurs partly through the Canadian archipelago where calculations of the currents from existing data show that there is a weak movement of water from the Arctic to the Atlantic. A much larger exchange between the Arctic Ocean and Atlantic occurs through the Norwegian Sea to the east of Greenland. For water deeper than a few hundred meters, this is the only path, and it is this entrance to the Arctic Ocean that must be studied if the major exchange of water between the Arctic Ocean and the other oceans of the world is to be understood.

The channels of the archipelago may not be major passages for exchange of water between the Arctic and Atlantic oceans; but when we consider what we know about currents within the channels of the archipelago, from the point of view of estimating local speeds and directions for such problems as the placement of pipelines, we find that the direct current measurements that are essential for this purpose are lacking, and our knowledge of the dynamics of the currents in the channels is inadequate. Our knowledge of characteristic features such as flushing mechanisms of the inlets of the archipelago is also poor. Experience gained in studies of the inlets at more temperate latitudes can be only partially translated into the Arctic as the Arctic inlet is ice-covered for most of the year and this leads to some unique features. Recent work by the Ocean and Aquatic Sciences, Pacific Region, for example, has shown that once-yearly flushing of arctic bays can occur very quickly, within a week, and that during most of the year wind mixing of surface waters does not occur due to the ice cover. Both processes are important aspects of the capability of the waters in an inlet to disperse pollutants.

Field programs in the arctic pose problems peculiar to the area. Most channels of the archipelago and the southern Beaufort Sea are accessible to operations from ships employing conventional techniques only during a short summer season. The Arctic Ocean, the continental shelf bordering the northwestern archipelago, and the northwest channels are icebound throughout the year. As a result, winter observations are scarce. Special techniques employing ice islands or sleds have to be devised to deploy equipment, and the equipment itself has to be developed to operate in arctic conditions.

Most Canadian oceanographic institutions have played a role in developing our oceanographic knowledge of the Arctic Ocean and the archipelago. The three laboratories most involved at present in studies of the currents and water structure are the Ocean and Aquatic Sciences, Pacific Region; the Defence Research Establishment, Ottawa; and the Marine Sciences Center, McGill University. The effort is not inconsequential, being about one-seventh of the total effort. A great deal of progress has been made in developing and deploying modern equipment to measure currents and other parameters. In terms of developing our knowledge of the current systems in the archipelago the program is progressing steadily, if slowly. As with the coastal zone there is a fast mounting demand to undertake special surveys and studies for environmental impact assessment. With the limited effort available, the basic research program could be quickly absorbed to the detriment of our future ability to understand the arctic and operate there. There seems no reason that industry cannot develop a capability for survey in the archipelago as it can in the coastal zone. Failing the development of this capability in industry, the effort in the federal laboratories and universities will have to be increased to undertake environmental assessment studies.

Oceans and Atmosphere

Oceanographers and meteorologists have long sought to predict changes in the oceans and atmosphere. The benefits of being able to do so are enormous and need not be elaborated here. Weather prediction has been with us for over 100 years and began with the assembly of synoptic charts of surface observations of temperature, pressure, and wind, which was made possible by the advent of telegraphy. From these early be-

ginnings forecasting of the weather for 1–2 days developed as a process of constructing synoptic charts of present conditions, and empirically forecasting change from a knowledge of past behavior of the weather systems. The advent of the computer following World War II gave to the meteorologist a tool that could be used to make numerical predictions based on the mathematical equations governing the motion of the atmosphere. Since then, numerical models of the atmosphere have been developed which hold promise of forecasts 2 to 3 weeks in advance, and the meteorologist has been able to fairly ask such questions as 'just how predictable is the weather?' and to study the type of observational network required to support the forecasting system. The models have also led to a better comprehension of the physical processes in the atmosphere that need to be understood if extended forecasts are to be possible.

The Global Atmospheric Research Program that was worked out in 1967 by the World Meteorological Organization and the International Council of Scientific Unions has as its first objective "to study those physical processes in the troposphere and stratosphere that are essential for understanding the transient behavior of the atmosphere as manifested in the large-scale fluctuations which control changes of the weather: this would lead to increasing the accuracy of forecasting over periods of one day to several weeks." Considerable progress towards the realization of this first objective has already been made. Global models of the atmosphere have been developed and, in 1977–78, a global-scale experiment "the First GARP Global Experiment" will be undertaken to provide the observations needed to test the models. The oceanographic input required to reach the first objective is not large, simply a synoptic description of the sea surface temperature which specifies the initial lower boundary condition for heat flux, and which need not be updated as the model is run during one forecast period. The ocean temperatures on the scale involved change relatively slowly compared to the movement of weather systems and during the short time scale of a week or two can be taken as constant. Even this simple synoptic description may be difficult to achieve.

Although large-scale changes in the ocean occur slowly enough that they are not of importance in short-term weather forecasting, the accuracy of the weather forecast has a significant impact on our ability to predict small-scale oceanographic features. Conditions within an inlet can respond in a matter of hours to changes in the wind field, and wave fields in the open ocean develop in response to the storm systems passing over them. Improvements in the prediction of weather will lead to improved prediction of these phenomena given an adequate understanding of the short-term action of the atmosphere on the ocean system. The wave generation problem, for example, has been discussed elsewhere in this report.

The second objective of GARP is "to study those processes in the troposphere and stratosphere that are essential to the understanding of the factors that determine the statistical properties of the general circulation of the atmosphere which could lead to a better understanding of the physical basis for climate." To these studies of processes in the troposphere and stratosphere must be added studies of processes in the ocean, if prediction of climate is to become a reality. There have already been studies which demonstrate a correlation between anomalies of sea surface temperature of 1–3 C over large areas of the oceans with shifts in weather patterns, on the time scale of months and of years. To go from this point to some form of predictive model of the climate, a determined effort to understand the basic physics of the interactions of the atmosphere with the ocean will be needed. The fluxes of heat, radiation, water vapor and momentum across the ocean atmosphere interface will need study. For the shorter time scales of months the interaction of the upper layer of the ocean will have to be included. As we go to progressively longer time scales the transport of heat by advection in the upper layers will become important, and at the longer time scales of centuries the whole ocean will become involved. It is highly likely that progress in understanding and prediction of climate will proceed in step with progress in understanding and predicting climatological features of the ocean, such as changes in the temperature of the upper layer or changes in current systems. It is precisely these changes that are sought in studies of the impact of large-scale changes in the ocean environment on fisheries and fish stock, so that we have as much interest in understanding the atmosphere to predict climatological changes in the oceans as we have in understanding the ocean to predict climatological changes in the atmosphere.

Geographically, Canada lies in an excellent position to undertake such studies. Two areas in the northern hemisphere exhibit particularly strong anomalies of sea surface temperature which correlate with changes in atmospheric conditions on the scale of months or a few years. They are located to the east of Newfoundland and in the central northern Pacific. The effect of warm or cold ocean temperatures in these areas

on atmospheric conditions appears to be most pronounced 50 to 80° further east. Another key area is in the equatorial regions of the Pacific where temperature anomalies have been associated with changes in the weather pattern of the whole northern hemisphere. A fourth area which plays a significant role in the large-scale atmospheric circulation is the polar ocean where the ice cover is the controlling factor on the heat exchange with the atmosphere. On a smaller but significant scale of interest to Canada, Hudson Bay, the Gulf of St. Lawrence, and the Labrador Sea, are large enough bodies of water that changes in ocean conditions leading to modification of the heat exchange processes with the atmosphere have a significant effect on Canadian climate.

A program directed at an understanding of the exchange processes of momentum, heat, and other physical properties across the sea surface developed at the University of British Columbia in the late 1950s and subsequently a group was established at the Atlantic Oceanographic Laboratory. The Canadian scientists have played a leading role in research on this aspect of the ocean–atmosphere problem, and the programs, although not large, are well developed. There is also increased activity on both coasts in studies of the processes in the upper layer and its exchange with the atmosphere. In the polar ocean a joint United States–Canada program (AIDJEX) has set out to work on the physical properties of sea ice, its interactions with the atmosphere, and its role in circulation and dynamics of ocean waters, and Canadian oceanographers working on transfer processes across the ocean–atmosphere boundary are participating. There is not in Canada, nor anywhere else, any substantial research aimed at understanding the role the physical processes of the ocean play in the large-scale interactions of ocean and atmosphere, i.e. approaching the problem from the climatological viewpoint. Without this type of study a great deal of progress cannot be made towards understanding and predicting climatological aspects of oceans and atmosphere. It is not to Canada's advantage to leave this aspect of research to be developed elsewhere as the results are so clearly of importance to Canada.

A start has been made at climatological studies by the Ocean and Aquatic Sciences, Pacific Region, and some work is done at McGill University, but only a minimal effort is possible. In the future, this work should be considerably expanded and a substantial group of scientists brought together. There is reason to begin fairly soon if we are to contribute to, and benefit from, the GARP second objective. The studies should initially be developed on the west coast as the ocean adjacent is much more responsive to local interactions with the atmosphere than the ocean adjacent to the east coast, where major boundary currents respond to the general oceanic circulation. Also, the Pacific is the ocean where the large-scale oceanic events have a most direct impact on Canadian climate. A great deal of the field work will have to be done in cooperation with other nations and on occasion it will be necessary to contribute to large-scale field programs. The GATE field program required 35 ships in the tropical Atlantic for 3 months. Canada sent the west coast weather ship the CCGS *Quadra* with a team of oceanographers and meteorologists, not a large contribution, but with an impact on the program because the work by the Canadian ship was exceptionally good. I digress here for a moment to point out that although Canada can contribute only in modest quantity to international experiments, Canada can meet her obligations to explore the world's oceans by ensuring that her contributions are significant because of their quality, and this means giving full support to the best oceanographers who undertake such work.

Physical Oceanography and Biology

The existence of marine life in the ocean is so intimately tied to conditions existing in the ocean environment that we cannot approach the requirements of the biologist simply from the point of view of what physical oceanographic information the biologist needs to tackle such problems as the prediction of fisheries. Studies of the relationships between environmental conditions and marine life have, in the past, yielded some convincing evidence that the movement of fish stock onto fishing banks, routes of migration, the survival of fish eggs, larvae, and coastal species, are influenced by changes in the ocean and coastal environment. With the rudimentary tools available, biologists have obtained only the most elementary of physical oceanographic information, usually temperature, and as a result an understanding of which environmental factor the biological system is reacting to is in a primitive state. Within the past 10 years much more sophisticated tools have become available in physical oceanography that can be utilized to describe the environment. Arrays of current meters are possible for studies of currents over spawning areas, techniques for the routine measurement of nutrients and oxygen concentration have advanced, and considerable advances have been made in techniques for studying turbulence and

microstructure in temperature and salinity. The acquisition of these techniques has lead to much improved large-scale studies, and has also opened the door to studies of the effects of the small-scale phenomena such as turbulence. Possibly the main impact at the present has been to emphasize that the dependence of the biological system on the environment *is* complex and involves interactions at many size and time scales. The problem has not been made any simpler as the biologist in recent years has begun to study the total ecosystem with its attendant difficulties of relating the scale and sequence of events in the physical environment to those in the biological system. The problem we are faced with is how to employ these tools and advance our knowledge of the reaction of marine life to the changing environment to the point that we can predict fisheries.

For the purpose of this report, I divide the problems of the biologist into four categories:

1) Hindcasting of what has happened when an unexpected and significant change occurs in the biological system such as collapse of a fish stock. The best that can be done is to make a study of the changes that have occurred in the environment as well as one can, and then relate them to the changes in the biological system. Success depends very much on the current state of knowledge. This type of project can be tackled effectively by a multidisciplinary project team and is being handled reasonably well, although there is a tendency for the team to be disbanded too early, before the truly interdisciplinary aspects of the problem are understood.

2) Prediction based on a present description of the environment. The tactical deployment of fishing vessels falls within this category and there have been sufficient instances of successful deployment, based on ocean temperatures in particular, to demonstrate that it can be done successfully for some species even though our ability to monitor ocean conditions is limited. There is not a great deal of effort applied in Canada and progress has mainly resulted from the work of isolated individuals in the biological laboratories who in recent years have used the METOC services to provide the necessary oceanographic information. A second aspect of prediction is the effect of present ocean conditions on the recruitment of stock, particularly survival at the larvae stages. It is not surprising that the biologist has not been able to carry studies of this aspect of stock recruitment to the point where he can specify which oceanographic parameter is important and should be monitored, because in the past only the simplest description of the environment has been available to him. The physical oceanographic instrumentation developed in the last 10 years offers the possibility of a tremendous improvement in studies in limited areas of the effect of currents, turbulence, density structure, changing temperature, salinity and nutrient supply, for example, on survival at the larval stage. To be successful such experiments will need a close collaboration between physicist and biologist, particularly in the design stages of the field program.

3) Prediction based on a prediction of changes in the environment. There are two parts to the solution of these longer-term prediction problems. One is an understanding of the environmental factors of importance; the other is their prediction. Progress in the latter is dependent on progress the physicist can make in prediction of ocean conditions, and progress in the former is dependent on the effort put into understanding the fundamentals of the ecosystem. It is unreasonable to expect that we will arrive quickly at the point where we can predict changes in the environment and the biological consequences. Some changes will be manmade, and when they occur every effort should be made to set up programs to study the physical and biological consequences as it is seldom that the natural scientist is afforded an opportunity to undertake a controlled experiment. Studies of the interrelationships between the environment and the biological system are not particularly well developed in Canada. There is a great deal of collaboration between physicists and biologists in the short term but no identifiable groups of any size that are addressing themselves primarily to the interdisciplinary problem.

4) Fundamental studies of the ecosystem. Studies of the fundamental relationships which govern the ecosystem are at an early stage of development and pose some of the most challenging problems in the marine field. The biologist, in attempting to formulate some statistical model of the system, finds himself at a severe disadvantage compared to the physicist. At least when addressing the complex problems which involve interactions between different scales and types of motion, the physicist is working from some firmly established laws of physics which can be quantified and expressed in mathematical form. That fish must eat to survive and grow is fundamental, but to quantify this statement into equations expressing growth rate of a species or a survival rate for plankton involves a multitude of factors, such as predator/prey considerations and availability of food, and yields mathematical relationships that are weakly held to. To go from such relationships to models of the whole ecosystem is

formidable. It is though, these relationships that the biologist seeks, and part of the search encompasses the physical environment. It is doubtful whether progress will be fast if research in this field is left to occasional collaboration between the physical and biological oceanographers, or by biologists proceeding alone with certain background information on the environment being sought from the physicist. However, this is generally the situation in Canada.

Oceanographic Services

The success in the research program should be reflected in the ability of centers set up to provide certain types of oceanographic information to industry and government agencies. There are three of these centers in Canada, the Marine Environmental Data Service located in Ottawa, and the two Canadian Forces Meteorological and Oceanographic centers, one located in Halifax, the other in Esquimalt.

The Marine Environmental Data Service acts as the national archives and information center for oceanographic data collected in Canadian waters and the adjacent seas, is responsible for tidal prediction for coastal regions, and undertakes climatological studies using data from the data bank or, in some cases, from field studies sponsored by MEDS. The service developed from the Canadian Oceanographic Data Center which was set up in 1962 with the restricted purpose of data archiving. The expansion of the center to include climatological studies for various clients has considerably broadened and strengthened the service that is provided. Centers which are solely concerned with archiving tend to become sterile and the techniques for data retrieval archaic to the frustration of both the personnel in the center and those who want to retrieve the data. The techniques employed by MEDS for data handling are among the most advanced in the world and MEDS has played a significant role in developing the facility of exchange of data between the world's national data centers. At the present time the balance between MEDS and the rest of oceanographic research and services seems about correct and should be maintained as the oceanographic program across the country is expanded.

In Halifax CF METOC is the more well developed of the two METOC services with a staff of one oceanographer and nine meteorologists. In Esquimalt CF METOC has no oceanographers and four meteorologists. These services provide meteorological and oceanographic forecasts for naval operations and other maritime users. In both centers the main oceanographic products are synoptic charts of surface temperature, mixed layer depth, and wave conditions adjacent to both coasts. These are broadcast on facsimile or by radio. Construction of the charts is by hand and based on acquisition of data from ships of opportunity. The data are transmitted by radio link to shore. The development of these centers is in a primitive state. The resources allocated to them are so small that there is little possibility of their experimenting and developing techniques for provision of better synoptic charts of ocean parameters, and no staff with the background that allows them to investigate the possibilities of forecasting. The user of the services provided has been the RCN and the development of the services in association with naval operations has been appropriate. If it had not been for the interest of the navy in developing such services, they would not have developed at all. The unsatisfactory aspect of the development of services in the military purview, with the centers located in naval dockyards, has been a lack of any input from the research programs in oceanography to improving the centers. In the past, this has not been serious, as not a great deal could have been done to improve the charts because of the sparse data available to construct them, and because knowledge of the oceans had not been advanced to the point that anything more could be done other than to construct the charts in an empirical fashion. Probably some improvement would have been effected but it could only have been marginal. Looking to the future we cannot view the operations of these centers with such equanimity. Many experimental programs, particularly some international ones, are directed towards those problems which, when solved, will lead to improved description of the ocean on a synoptic and on a predictive basis. There is also the prospect of greatly improving the acquisition of data through the use of satellites, fixed and drifting buoys, and improvement of the data acquired from ships in transit. In the long term the practical expression of research on ocean climatology and ocean modeling will be some form of service which, in view of the increase in activity in the ocean, will have a diverse clientele. Both the developments in research and the future prospect of providing greatly improved services argue for establishing centers on both coasts to provide oceanographic services outside the military. The centers will need access to computers and will need to be staffed with personnel trained in physical oceanography and mathematics to the masters level at least.

A fourth service of importance but not strictly oceanographic is the provision of ice prediction

services by Ice Central (DOE) in Ottawa. Ice Central prepares charts of ice distribution from the Beaufort Sea to the Gulf of St. Lawrence which are transmitted by radio facsimile, and also estimates dates of freeze-up. Forecasting the movement of ice fields requires knowledge of the wind field and ocean currents. The wind field which has the greatest influence on ice movement is obtained from a meteorological forecast but there are no available data on the current field at the time of the forecast and the forecast is done using a climatological current pattern in the area of the forecast. To provide real time information on current patterns on the scale required is not possible now, or in the near future, and will have to await the development of better systems to monitor the ocean. The ability to predict ice movement over the continental shelves would, however, be enhanced by a better knowledge of the current systems in the Beaufort Sea, along the Labrador coast, and in Hudson Bay and Strait, and Foxe Basin.

At present there is no great need of current information in the archipelago as the shipping has left the archipelago by freeze-up, although the Ministry of Transport does foresee the development of icebreakers capable of operations in winter conditions which will need a year-round forecast of pressure situations in the pack. The stress of the wind field is believed to be the key factor. Forecasting of freeze-up requires a knowledge of sea conditions in late fall and of atmospheric conditions as the winter develops. The necessary temperature and salinity data is obtained for the Gulf of St. Lawrence by the Atlantic Oceanographic Laboratory each November. To extend the prognostication to the Beaufort Sea will require similar data. The major requirement for ice prediction lies in areas over the continental shelves stated above with the addition of the single most important area, the Gulf of St. Lawrence. It is in these areas that the present oceanographic program is weakest and where we understand little about the current systems except in the grossest detail.

Conclusions and Recommendations

The most striking feature that has appeared in the course of discussions with oceanographers and others with an interest in the ocean is the amount of use being made of our knowledge of the physical characteristics of the ocean and of existing data. Fifteen years ago, if asked what use was made of physical oceanography, a scientist might well have replied that it was mainly a support to scientists in other disciplines, and the biologist with his interest in fisheries and the physicist concerned with maritime defense problems would likely have been quoted as the scientists most interested. All this has changed. The oceanographic laboratories and services are hard put to meet requests for advice, data, and special studies from almost all who are associated with the ocean, and they range from municipalities concerned about the placement of sewage outfalls, to politicians who are concerned with negotiating international argeement on ocean usage; and from engineers designing miniature submarines to inspect undersea telecomunication cables to operators of transoceanic shipping who are concerned with cargo safety and transit times. To grasp a perspective of what has happened and what is needed in terms of ocean management is not easy, because at the present time the problems emerge in bits and pieces, all of which are urgent as far as the person who has the problem is concerned. It is the conclusion of this report that the future will see the emergence of oceanographic services of considerable scope. Some services will be concerned with provision of large-scale description and forecasts; others will be concerned with local conditions, particularly in the coastal area where the shape of the physical boundary is a determining factor on the local oceanography.

If we are to manage the resources of the ocean we must now consider the magnitude of the problem that Canada faces. All Canadian coastal areas, the continental shelves, and the deep sea are involved. There is no need to look speculatively to the future and conjecture whether any activity, and if so what type, will take place in the remote areas of the arctic or deep sea; to varying degrees we are already involved in practical problems in these areas that require solution. What I am saying here is that the case for a Canadian oceanographic program that embraces all the continental shelves and coastal area, including the deep sea, has been made by the reality of the practical problems that are with us today. We cannot isolate aspects of physical oceanography and leave these undone with the rationale that they have only some nebulous application in the future. If we consider the variety of oceanographic conditions that are found bordering Canada with which we must contend, viz. the length of the coastline and the area of the continental shelves, and that oceanography on a global scale is involved, we face the challenge that in terms of management, Canada has to solve as large a variety of oceanographic problems as any country in the world.

Basic Research

Canada should maintain a versatile program in research and should develop over the long term scientists who are well versed in all aspects of oceanography. At any time, the balance will and should shift from one aspect to another, depending on where the scientists see opportunities for progress and are influenced by practical needs. It is not seen to be of advantage to elect that the Canadian program should be restricted to two or three specialized areas. The present basic research program needs only modest expansion to provide both a reasonable balance and the minimal number of scientists in each activity required to make significant progress.

Three aspects of basic research demand attention because they offer considerable potential for advance in oceanographic science with important applications for resource management.

1. The physical oceanography of the continental shelves and adjacent oceans — Of all the areas bordering the Canadian coast, the waters over continental shelves are the least well studied. On banks on the shelves and along the edges lie major fisheries and on these shelves and adjacent slopes exploration for oil will be carried out. The 200-mile economic zone proposed at the Law of the Sea conference in Caracas covers a great deal of the shelf area and carries a responsibility on Canada's part to manage exploitation of resources. There is no program formally in place as yet that will provide the oceanographic knowledge required for such management. From the scientific viewpoint, the shelves have hardly been touched and there is the opportunity to undertake challenging experimental and theoretical studies.

2. Climatological studies of the ocean and development of numerical models — Studies of the climatological aspects of the oceans and the development of numerical models have received little attention in Canada. These are coming fields and offer the prospects of major advances in our understanding of the oceans. These studies also offer the best prospects for advancing toward a predictive capability for both oceans and atmosphere. Not only the major oceans are involved but also the smaller water bodies, the Gulf of St. Lawrence, and Hudson Bay, where exchanges with the atmosphere can influence climate.

3. Fisheries oceanography — There is considerable room for improvement in studies directed to the understanding of the interrelationships between the environment and marine biology, and in the application of the knowledge to fisheries. Short-term projects that can be managed in 1 or 2 years and that involve background oceanographic information for a primarily biological study are supported at an effective level. There is little evidence of any teams even of two or three scientists addressing these problems in the long term. It is not the intention in this report to formulate a recommendation as to what should be done as this problem should be considered within the context of biology and fisheries management. It is pointed out, however, that the development of these longer-term studies is essential if the results of physical oceanographic research is to be applied to fisheries.

The other parts of the research program are developed to the point where we do have minimal expertise to address the varied problems that arise as use and manipulation of the oceans and coastal waters increases. Coastal oceanography takes roughly 50% of the effort but this is commensurate with the variety of problems facing us in the coastal areas at present. Studies of sedimentary depositional processes and shoreline processes are not as well developed as they might be, but there is increasing activity in this field, particularly with the intention of the Institut national de la recherche scientific océanologie, Université du Quebec at Rimouski to develop studies along these lines. Oceanographic studies in the Canadian archipelago and other areas of the arctic are not strongly developed but are progressing at a much faster pace than previously. An increase in oceanographic activity in the arctic is contained in the recommendation for a program of studies of the continental shelves.

It is of concern that the expansion of physical oceanography that occurred in the 1960s has slowed and plateaued at a time when the demand for the services of the physical oceanographer has so markedly increased and shows every sign of continuing to increase. The build-up in the 1960s was primarily aimed at developing young scientists and laboratories in Canada in this rapidly advancing branch of ocean science. Physical oceanography has passed the point where great advances are to be made by exploring, mapping, and interpreting the easier to measure characteristic features of the oceans such as temperature and salinity. Modern physical oceanography requires a mixture of scientists well-versed in the mathematics and physical principles of fluid mechanics and able to carry out experimental studies for which they must develop new and sophisticated techniques. The program of the 1960s was successful in developing this type of expertise to the point that in some aspects of physical oceanography, Canadian scientists are among the world's leaders. The total number of

physical oceanographers is, however, only 86 and on this group rests the task of continuing to advance our knowledge of the oceans, to undertake surveys and provide services, and to administer the whole program.

There is no peripheral group in industry or government agencies or in the biological laboratories with the training that enables them to absorb the increasing demand for services. The result of this plateauing of the overall effort can only be that the expertise will be eroded away as more and more scientists become involved on surveys, committees, and so on, without sufficient time to develop themselves or their research. The scientists as individuals should not be isolated from a reasonable amount of involvement in practical problems; in fact, if their knowledge and expertise is to be used, they must be involved. The present situation is, though, that the degree of involvement is getting to the point where there is a serious danger of destroying that very scientific competence that has been built up at so much trouble and expense. One answer is to train more scientists and increase the overall *research* effort in the universities and government research laboratories by two to three times so that the load can be distributed. The view of this report is that this is not the way to go because, in the long term, it is believed that the usage of the ocean will increase to the point that some form of oceanographic *services* must evolve, and a start should be made in developing them.

Applied Oceanography

In the last section it was pointed out that the whole load of physical oceanographic survey and services falls on the universities and governmental research laboratories and that a capacity to respond to these practical requirements should be developed. These services are seen as developing in three categories.

a) There will always be a requirement to maintain and develop a national archiving service and an associated capacity to retrieve the data in various forms in response to the need of various clients. The present Marine Environmental Data Service services this requirement well and should continue to do so.

b) There is and will be a requirement to produce large-scale synoptic charts and forecasts for general distribution or broadcast. The network for providing those services will be extensive and in some cases of global extent. A great deal of data processing and manipulation will be done by computer.

c) The requirement for surveys of limited areas, particularly the coastal zone, will continue along with the requirement to undertake assessments of environmental impacts. Many short-term studies and assessments could be carried out by industry if a capability to undertake surveys can be developed in the private sector. The make or buy policy provides the way to do so and the federal oceanographic laboratories have already begun to explore the possibilities of contracting out. The private sector will need time to obtain the services of qualified oceanographers, at least another 5 years, and during this time will need support by government contract, and a policy on the part of the federal laboratories to phase themselves out of the 'ocean survey' business. There is no reason why industry should not serve industry when industry is the customer, with federal and provincial agencies playing the role of ensuring that the national interest is met if the work is related to environmental assessment and protection.

Costs

It has not been the objective of this report to make a detailed study of costs of the oceanographic program of the future. However, an estimate of the cost is as follows:

The basic research program would be in fairly good shape if it was expanded at a rate of 7% for the next 5 years. This would add about 35 research scientists to the total effort. Based on the budget of the Atlantic Oceanographic Laboratory the cost of maintaining one research scientist, including technical support, material, and ship time is $200,000. Thus, the increase in the federal budget after 5 years would be $7,000,000; of this, part should go to the universities, part to the federal laboratories, and part to industry, through the federal laboratories, to finance basic research contracts placed in the private sector by government.

There should also be an increase in the amount spent by industry in undertaking environmental assessment. It is difficult to place a figure on this amount as the demand for environmental assessments continues to increase.

In the early 1980s it will be necessary to finance centers on both coasts to pull together the prediction services in existence, and to provide the means to further develop these services. Including staff, computer, and space, the cost will initially run about $40 million. Two powerful computers will be the major part of the cost. The figure looks large but can be offset by utilization of the computers by others in the region.

As has been pointed out the above figures are crude, but it is believed that they give an estimate of the magnitude of the increase in effort that is required.

Recommendations

1) The Canadian program should be expanded to include a substantial effort in ocean climatology. As a start a group should be established on the west coast working on climatological problems.

2) A program on numerical modeling of ocean circulation should be started on the east coast.

3) A program of oceanographic studies should be staffed and funded for the continental shelves of the western and eastern seaboards including the Beaufort Sea and the Labrador–Hudson Strait–Baffin Bay areas.

4) Civilian centers should be established on each coast to provide oceanographic prediction services that are commonly used. A start should be made now.

5) The future curriculum of the university departments or institutes of oceanography should incorporate studies and training in numerical modeling and ocean climatology.

6) It will be necessary for the universities to develop a program to the Masters level to meet the need of industry and the federal agencies for staff for environmental assessment and prediction services.

7) The staff and funding of the universities in physical oceanography need to be increased if they are to meet the needs of recommendations 5 and 6.

Acknowledgments

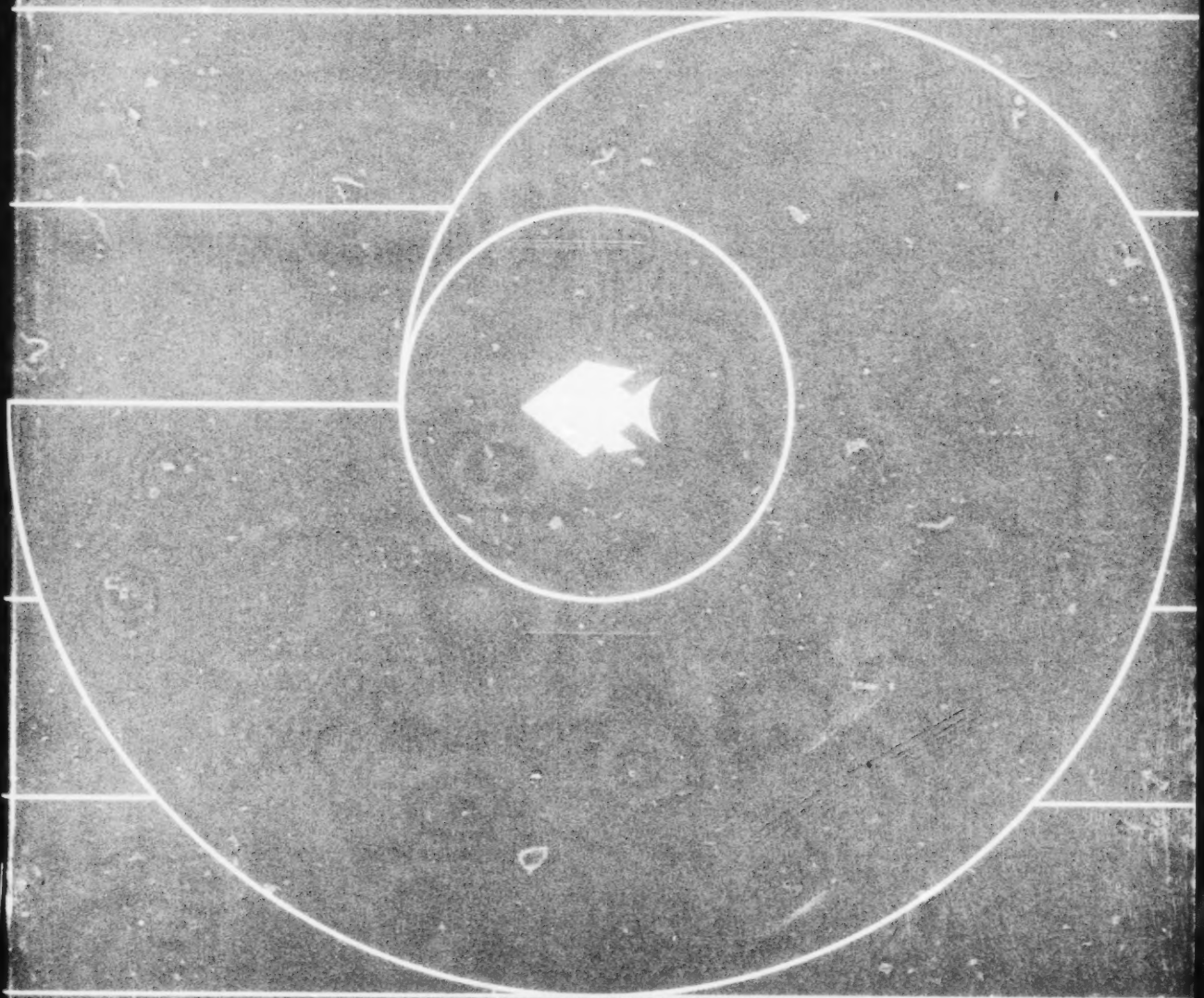
This study could not have been completed without the assistance of many of the physical oceanographers in Canada, who willingly gave of their time in discussions of their work and the future of physical oceanography.

I would particularly like to thank Drs W. L. Ford, G. T. Needler, G. L. Pickard, S. Pond, and J. C. Swallow who read the paper carefully and made many helpful comments.

Rapports de l'Office des Recherches sur les Pêcheries du Canada

Océanographie physique au Canada

par C.R.Mann



La série de Rapports de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada comprend des comptes rendus d'études et de symposiums et des rapports spéciaux.

Rapport n° 1 — (The Way Ahead) Colloque marquant le 75e anniversaire de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada.

Rapport n° 2 — L'Office des recherches sur les pêcheries du Canada — soixante-quinze années de réalisation. Par W. E. Ricker.

Rapport n° 3 — Science pour les pêches canadiennes dans les mers du plateau continental Par H. A. Regier et F. D. McCraken.

Rapport n° 4 — Océanographic biologique au Canada : Perspective et revue. Par T. R. Parsons.

Rapport n° 5 — Natura Naturans : Un colloque sur le paradigm de Fry.

Rapport n° 6 — Développement d'une aquiculture structurée, avec perspective canadienne. Par G. I. Pritchard.

Rapport n° 7 — Science pour les pêches dispersées de l'intérieur canadien. Par H. A. Regier.

Publié par

Environnement Canada
Service des pêches et des sciences de la mer

Bureau du Rédacteur
116 Lisgar, Ottawa K1A 0H3

Published by

Environment Canada
Fisheries and Marine Service

Office of the Editor
116 Lisgar, Ottawa K1A 0H3

No de catalogue Fs 97-10/8
Prix : Canada: $3.00 Autres pays: $3.60
ISBN 0-660-00531-X
Prix sujet à changement sans avis préalable
Imprimerie Donald F. Runge Limited, Pembroke, Ont., Canada
Contrat 02KT.KF801-6-0375

RAPPORT DE L'ORP

OCÉANOGRAPHIE PHYSIQUE AU CANADA[1, 2]

C. R. MANN

Laboratoire océanographique de l'Atlantique
Institut Bedford d'océanographie, Dartmouth, N.-É.

Table des matières

2 RÉSUMÉ/ABSTRACT

2 INTRODUCTION

2 OCÉANS, ESTUAIRES, FJORDS ET UN ARCHIPEL

- Trois océans
- Fjords et estuaires
- Un archipel

5 USAGES DES RENSEIGNEMENTS EN OCÉANOGRAPHIE PHYSIQUE

- Transports
- Les pêches
- Ressources pétrolières et minérales
- Qualité de l'environnement
- Température et climat
- Autres usages

8 RECHERCHES

- Marées, tsunamis, ondes de tempêtes et vagues
  - *Marées*
  - *Tsunamis*
  - *Ondes de tempêtes*
  - *Vagues*
- Dynamique et circulation
  - *Phénomènes à petite échelle*
  - *La zone côtière*
  - *Les océans et eaux des plateaux continentaux*
  - *L'archipel Arctique canadien et l'océan Arctique*
- Océans et atmosphère
- Océanographie physique et biologie

19 SERVICES OCÉANOGRAPHIQUES

21 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

- Recherches fondamentales
- Océanographie appliquée
- Coûts
- Recommandations

24 REMERCIEMENTS

[1]Version française de « Perspectives », publié dans le *Journal de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada*, 1976, 33(6): 1411–1433.

[2]Le présent rapport a été préparé, sous contrat, à la demande de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada qui ne partage pas nécessairement le point de vue de l'auteur.

Résumé

MANN, C. R. 1976. Océanographie physique au Canada. Rapport de l'ORP No. 8: 1–24

L'auteur décrit le programme de recherches fondamentales en océanographie physique au Canada. Il examine l'emploi des renseignements en océanographie physique dans le développement des ressources, l'évaluation de l'environnement, la prédiction du climat et autres activités marines. Une constatation majeure découlant de l'étude est que l'utilisation des renseignements en océanographie physique a augmenté et continuera d'augmenter. La recherche fondamentale en océanographie des pêches, en climatologie des océans et en développement de modèles numériques est inadéquate. L'auteur fait des recommandations visant à améliorer la recherche et les services de base.

Accepté le 15 mars 1976

Abstract

MANN, C. R. 1976. Physical oceanography in Canada. FRB Report No. 8: 1–24

The basic research program in physical oceanography in Canada is described. The use of physical oceanographic information in resource development, environmental assessment, prediction of climate, and other marine activities is examined. A major finding of the study is that the use of physical oceanographic information has increased and will continue to do so. Basic research in fisheries oceanography, ocean climatology, and numerical modeling is inadequate. Recommandations are formulated to improve basic research and services.

Accepted March 15, 1976

Introduction

Cette étude a pour objet l'évaluation de l'efficacité et de la suffisance du programme canadien en océanographie physique et de recommander des moyens de l'améliorer, gardant à l'esprit sa valeur potentielle pour la gestion des ressources, tant vivantes que non vivantes.

Nous nous sommes limité dans cette étude aux océans, eaux côtières, baies, estuaires et fjords. Les voies navigables intérieures et les réseaux fluviaux en sont exclus. Il en est de même de la recherche sur les propriétés de la glace de mer, sur les processus de sédimentation et autres phénomènes géologiques. Ces points n'ont été considérés que lorsque une connaissance de la sphère aquatique est nécessaire à leur compréhension.

Tout au cours de la première moitié du siècle présent, les renseignements sur la physique des océans se sont graduellement accumulés grâce au travail d'un nombre relativement petit de scientifiques se servant de techniques d'observation développées à la fin du XIX^{e} siècle. Ce fut la période d'exploration et de cartographie des principaux courants et des masses d'eau des océans, caractérisés par leur température et leur salinité. Ce fut également la période des premières études de courant dans les chenaux et des caractères physiques des anses. Comme outils, l'océanographe physicien se servait du thermomètre à renversement pour la mesure de la température, de la « bouteille d'eau » pour prélever des échantillons d'eau en profondeur pour les mesures de salinité et le courantomètre pour déterminer la vitesse et la direction des courants. Les courantomètres étaient d'usage plutôt limité parce qu'il n'était pas facile de les amarrer et d'enregistrer les courants sur de longues périodes. Presque toutes nos connaissances des courants océaniques provenaient de l'interprétation des champs de température et de salinité à l'aide d'une théorie dynamique reliant les champs de température et de salinité aux courants en régime stationnaire. Durant les années 1950 et au début des années 1960, des méthodes plus raffinées fondées sur les récents progrès technologiques commencèrent à influencer l'exploration des océans. Ces techniques nouvelles permirent une détermination plus précise de la salinité, une mesure de la micro-structure thermique et l'amarrage d'appareils capables d'enregistrer les courants durant de longues périodes. La flotte mondiale de navires océanographiques se développa rapidement et leur déploiement permit de faire la cartographie presque complète des principales caractéristiques en régime stationnaire des océans. Avec ces connaissances de base, le physicien commença à étudier les changements qui se produisent dans l'océan et les interactions entre l'océan et l'atmosphère, et entreprit des investigations sur les phénomènes à petite échelle. Les observations permirent également de faire des progrès considérables dans l'application des principes de la mécanique des fluides à la dynamique des océans, et la théorie se développa à un rythme accéléré. C'est dans le contexte de cette vague grossissante de connaissances que cette étude a été entreprise.

Océans, estuaires, fjords et un archipel

TROIS OCÉANS

Le Canada est baigné par trois océans, l'Atlantique, le Pacifique et l'océan Arctique. Les courants et les

masses d'eau de ces océans ont une profonde influence sur la température et le climat, et sur les conditions océanographiques qui prévalent sur les plateaux continentaux et dans les anses et chenaux de la côte.

La côte occidentale du Canada borde l'extrémité nord-est du Pacifique Nord, qui est de beaucoup le plus vaste océan du monde. Le principal courant du Pacifique Nord, le Kuro-Shio, se dirige vers le nord sur le côté occidental de l'océan, dépasse le Japon, pour ensuite se diriger vers l'est et s'élargir en un lent mouvement d'eau océanique vers la côte de l'Amérique du Nord. À environ 500 km à l'ouest de la côte de Washington–Orégon, le lent courant se divise, une partie tourne au sud pour couler le long de la côte californienne, et l'autre au nord vers la côte occidentale du Canada. Près de la côte, les eaux superficielles sont diluées par l'apport d'eau douce en provenance des montagnes côtières. L'influence de cet écoulement sur la salinité des eaux superficielles se fait sentir sur le plateau continental et à plus de 500 km au large de la marge du plateau. Sur une échelle chronologique allant de plusieurs mois à une année, les conditions océanographiques de la côte occidentales semblent être en grande partie dominées par des interactions locales avec l'atmosphère. La couche superficielle d'eau douce se déplace vers le large en été, grossie par l'écoulement printannier d'eau douce provenant des montagnes de la côte et poussée par les vents prédominants de nord-ouest qui entraînent l'eau superficielle vers l'ouest. En hiver, la poussée des vents de sud-est, résultant de l'établissement d'une aire de basse pression couvrant la partie septentrionale du Pacifique Nord, entraîne les eaux douces superficielles contre la côte. Le transport de l'eau océanique est également déterminé par le champ du vent du Pacifique Nord-Est qui influence non seulement le transport des couches superficielles, mais également le transport de l'eau profonde. En l'absence de forts courants, les fluctuations d'une année à l'autre de la variation annuelle de la température de la couche superficielle semblent être contrôlées par un échange local de chaleur avec l'atmosphère et seulement secondairement par advection de chaleur à échelle océanique.

Les océanographes ont traditionnellement considéré le Pacifique comme un océan tranquille comparativement à l'Atlantique. Cependant, des études récentes ont démontré que les courants le long de la côte occidentale sont plus complexes qu'on ne l'avait cru. L'incidence de maxima et de minima relatifs dans le champ des températures le long d'une ligne se rendant à la station météorologique « Papa » est, croit-on, liée à la présence de courants locaux ou de tourbillons dans l'écoulement général vers le nord le long de la côte canadienne. On a également des preuves d'un tourbillon permanent ou semi-permanent au nord-ouest des îles de la Reine-Charlotte. Ces caractéristiques sont mal décrites et il reste beaucoup à faire avant que l'océanographie du Pacifique Nord-Est ne soit entièrement comprise.

Contrairement au Pacifique Nord-Est, l'océanographie de l'Atlantique Nord-Ouest qui borde la côte orientale du Canada est dominée par les forts courants limitrophes qui se trouvent sur le côté occidental d'un océan. Deux des courants majeurs de l'Atlantique Nord, le Gulf Stream et le courant du Labrador, exercent une influence prépondérante sur les températures et la salinité le long de la côte est; le ruissellement local et l'échange de chaleur avec l'atmosphère jouent un rôle secondaire. Le Gulf Stream se dirige vers le nord-est à 200 km ou plus au large de la marge du plateau continental, passe au large de la Nouvelle-Écosse et de Terre-Neuve, tourne ensuite à l'est pour traverser l'Atlantique. L'eau salée, chaude, du Gulf Stream envahit le plateau néo-écossais et la marge sud des Grands bancs, et pénètre dans le golfe Saint-Laurent par le chenal Laurentien. Le courant du Labrador prend naissance dans le courant de l'île Baffin et le courant du Groenland oriental, et transporte de l'eau froide et de salinité relativement faible vers le sud le long de la côte du Labrador pour baigner les Grands bancs. L'eau froide pénètre dans le golfe Saint-Laurent et sur le plateau néo-écossais au-dessus de l'eau qui provient de l'Atlantique. Un mélange intense entre les eaux froides du courant du Labrador et les eaux chaudes du Gulf Stream donne naissance à des régimes de température et de salinité compliqués et variables le long de la marge du plateau continental où il n'est pas inusité de trouver des températures de surface qui varient de 8 C en l'espace de quelques kilomètres. L'écoulement vers le sud de l'eau arctique froide cause de sérieuses conditions de glace le long de la côte orientale. Toutes les eaux côtières au nord du Cap-Breton et du golfe Saint-Laurent sont recouvertes de glace en hiver, et les restes de glace d'hiver du Golfe sont souvent transportés vers le sud jusqu'à Halifax par un courant qui se dirige vers le sud. Le long de la côte du Labrador, les banquises sont transportées vers le sud par le courant du Labrador jusque sur les routes de navigation au sud-est de Terre-Neuve.

Les profondeurs océaniques à l'est du Canada sont également dominées par de forts courants profonds. L'eau qui a atteint les profondeurs par refroidissement et mouvement de descente dans la mer Norvégienne se répand au-dessus des crêtes situées entre le Groenland et l'Écosse, et coule vers le sud dans l'Atlantique comme courant limitrophe occidental profond. L'eau provenant de ce courant peut être identifiée dans le Pacifique Sud aussi à l'est que la Nouvelle-Zélande, ayant traversé l'océan Atlantique dans toute sa longueur et ensuite tourné à l'est autour de l'Antarctique.

La côte septentrionale du Canada borde l'océan Arctique, le plus petit des océans du monde et le

moins étudié. C'est presque une mer intérieure qui a comme caractéristique unique une couverture superficielle permanente de glace de pack. En été, la glace se retire de la côte d'Alaska et de la terre ferme canadienne, permettant une courte saison de navigation. Le bord le plus septentrional de l'archipel canadien est bloqué par la glace à l'année longue. Une caractéristique importante de cet océan est la présence d'une couche superficielle d'eau de salinité relativement faible produite par les cours d'eau du Canada et de l'URSS. La couche superficielle d'eau douce se trouve au-dessus de l'eau plus salée en provenance de l'Atlantique par la mer Norvégienne. La brusque augmentation de densité à la surface inférieure de la couche supérieure limite la convection en profondeur et l'échange thermique avec l'eau profonde plus chaude. Cette limitation de l'échange thermique avec l'eau profonde est une condition du maintien du pack polaire. On n'a que très peu de renseignements sur les courants de cet océan, si ce n'est que la circulation générale est dans le sens des aiguilles d'une montre. La circulation crée un courant vers le sud et vers l'ouest le long de la côte nord-ouest de l'archipel Arctique et de la partie occidentale de la côte nord de la terre ferme.

Fjords et estuaires

La côte canadienne est échancrée de centaines d'anses dont l'océanographie est déterminée par la morphologie de l'anse, l'écoulement des rivières, le climat local et les conditions océanographiques prévalant à l'entrée. Certaines de ces anses sont classifiées comme estuaires, et la circulation de l'eau dans l'anse est fortement influencée par un grand débit d'eau douce en provenance de la terre. D'autres entrent dans la catégorie des fjords, anses profondes avec seuils à l'entrée contrôlant l'échange d'eau profonde dans l'anse avec l'eau de l'océan à son embouchure. D'autres encore ne sont que des baies dépourvues de seuil distinctif et peu influencées par le ruissellement, mais possédant quand même leur propre caractéristique de courant déterminée par leur forme, les marées et les vents locaux.

La côte occidentale est la plus finement détaillée. La côte de la terre ferme et de l'île Vancouver est échancrée de nombreuses anses profondes, étroites et longues, ouvrant sur la mer à une extrémité et ayant souvent une rivière à l'autre. Cinquante-sept ont une longueur de plus de 18 km. Les anses sont profondes, plus de 600 m pour quelques-unes, et la plupart ont un seuil à une profondeur variable, caractère morphologique qu'elles partagent avec un fjord. La circulation et les caractéristiques de l'eau sont déterminées en grande partie par le ruissellement d'eau douce qui, variant avec la saison, entraîne un changement saisonnier dans les propriétés de la couche superficielle. L'échange d'eau profonde avec la mer ne se produit que sporadiquement. Plusieurs îles se trouvent le long de la côte. Entre les îles et la terre ferme existe un réseau compliqué de voies navigables, largement utilisées par les navires et supportant des pêches commerciales importantes. L'océanographie de ces chenaux est complexe et est dominée par les processus d'estuaire et de marée. Les courants sont très forts; dans l'inlet Seymour par exemple, les courants de marée atteignent des vitesses de 14 noeuds. Sous l'influence des marées, l'eau à l'intérieur des passages oscille dans un mouvement de va et vient qui, avec la turbulence engendrée par les courants, déclenche des processus de mélange compliqués.

Les deux caractères géographiques majeurs de la côte orientale sont la baie de Fundy et le golfe Saint-Laurent. La baie de Fundy est un des rares systèmes dans le monde où la période d'oscillation naturelle de la baie et du plateau se rapproche de la période de la marée. Les eaux du bassin des Mines à la tête de la baie réagissent aux marées, et le niveau de l'eau s'élève et s'abaisse de plus de 13 m. Les forts courants de marée produisent également un mélange considérable. Par sa superficie, le Golfe est presque une petite mer et a ses propres problèmes spéciaux. Il est partiellement un estuaire à cause du débit du fleuve Saint-Laurent, mais le vent, le transfert de chaleur, les marées et les courants de marée jouent des rôles dynamiques importants et déterminent la circulation. Les anses plus petites le long de la côte orientale possèdent leurs systèmes de courant individuels. Bien souvent, le ruissellement n'a pas une influence très grande sur leur océanographie, et leurs caractéristiques de courant et de chasse d'eau sont déterminées par le régime des vents et par les conditions de l'océan à leur entrée. Les anses le long de la côte du Labrador et de l'île Baffin sont en grande partie inexplorées du point de vue océanographique.

Un archipel

Bordant l'océan Arctique et s'étendant vers le sud-est jusqu'aux confins les plus au nord de l'Atlantique, se trouve un système de chanaux et d'îles qui forment l'archipel Canadien. Cet archipel est unique. Les chenaux sont profonds, ont des rives remarquablement escarpées et, durant la majeure partie de l'année, sont fermés par la glace.

Il y a 16 passages principaux dont la largeur varie entre 10 et 20 km et la profondeur de quelques dizaines de mètres à plus de 700 m. L'eau de l'océan Arctique se déplace vers l'est et pénètre dans l'archipel. La couche superficielle coule vers l'est jusqu'à la baie Baffin, mais l'eau profonde est bloquée par les hauts-fonds des chenaux dans l'archipel central. L'eau profonde des chenaux à l'est des seuils provient de la baie Baffin. La distribution des températures et des salinités dans les chenaux a été décrite en été, mais

il y eut peu de mesures de faites en hiver. Les anses des îles possèdent chacune leurs caractéristiques particulières, la chasse d'eau se produisant durant une courte période de l'été. Sauf pour une description générale des courants et des températures et salinités caractéristiques, les détails de l'océanographie de l'archipel sont en grande partie inconnus, et ce n'est que très récemment qu'on a étudié les caractéristiques des anses et des courants dans les chenaux.

Au sud de l'archipel, la baie d'Hudson forme une mer intérieure peu profonde d'une superficie de 520 000 km^2. Nos connaissances de l'océanographie de la baie sont rudimentaires. L'apport d'eau douce du Bouclier canadien donne à la baie le caractère d'un estuaire. On croit généralement que la circulation se fait dans le sens des aiguilles d'une montre et que l'eau profonde est renouvellée par de l'eau provenant du détroit d'Hudson et du bassin Foxe.

Usages des renseignements en océanographie physique

La connaissance la plus largement utilisée que nous ayons des océans est celle des marées. Il est possible de prédire avec une très grande précision le temps et l'amplitude de la marée le long des côtes, dans les baies et dans les ports. Des tables des marées ont été publiées pour toutes les parties du monde. C'est cette aptitude à prédire les marées qui a entraîné l'usage universel de cette information par tous ceux qui utilisent la mer. Nous ne sommes pas encore en mesure à l'heure actuelle de prédire la plupart des autres aspects physiques de la mer, e.g. les fluctuations des courants et des températures sur un lieu de pêche. Le Canada est à mettre sur pied certains services de prévision, notamment des vagues et de la glace de mer, et, dans les cas où ces prévisions atteignent un degré raisonnable de fiabilité, elles sont largement utilisées. Il n'y a pas de raison de croire que nous ne pouvons prédire d'autres caractéristiques physiques des mers. Certaines de ces caractéristiques, telles que le développement des tourbillons dans un écoulement moyen, peuvent se produire suffisamment au hasard pour qu'il soit impossible de les prédire. Notre capacité future à prédire dépend de l'effort consacré à la compréhension de la physique des océans.

Les renseignements le plus communément utilisés à l'heure actuelle se divisent, dans leurs grandes lignes, en deux catégories. La première comprend les renseignements climatiques, c'est-à-dire les conditions moyennes et extrêmes prévalant sur une période de plusieurs années. La seconde englobe des renseignements détaillés sur l'océanographie des régions locales. L'usager intéressé des renseignements climatiques dépend entièrement de l'étendue des connaissances acquises dans le passé, avant que son problème ne se pose. Le degré auquel il pourra trouver une réponse satisfaisante immédiate dépend de l'état actuel des connaissances.

L'information climatique est utilisée dans la construction d'appareils utilisés en mer et peut servir à calculer les charges et les tensions dans la construction des structures ou à évaluer leur usage opérationnel. Le développement du système canadien de sonar à profondeur variable au cours des années 1950 est un bon exemple d'une application des connaissances. Cet appareil a été construit pour opérer en profondeur et mettre à profit les canaux acoustiques qui se trouvent dans l'Atlantique Nord à des profondeurs de 50 à 100 m. Les canaux acoustiques sont créés par des inversions de température. Ce sonar est fondé sur une évaluation de la profondeur à laquelle ces inversions se produisent, en moyenne, et sur une évaluation des régions de l'Atlantique Nord où les canaux acoustiques sont présents et où le sonar peut être effectif. Ces évaluations ont été faites à partir de l'étude d'une longue série de données sur la température.

Dans bien des cas, les données chronologiques ne sont pas suffisamment détaillées ou n'existent pas, surtout si l'on doit connaître la force et la direction des courants. Il est alors nécessaire de mettre sur pied un programme de relevés en vue de cueillir les données requises. Les problèmes pratiques qui se posent dans les anses et les chenaux entrent presque invariablement dans cette catégorie. Le nombre d'études à court terme entreprises par les laboratoires du gouvernement fédéral et par les universités en réponse à des demandes de renseignements a augmenté de façon dramatique au cours des quelques dernières années. La pollution et l'état de l'environnement, les pêches et les transports sont presque toujours à l'origine de ces demandes. La plupart se rapportent aux problèmes qui surgissent dans les anses, les chenaux et les mers avoisinant la côte.

Transports

Les facteurs qui ont contribué à rendre les renseignements océanographiques beaucoup plus importants maintenant que dans le passé dans le domaine des transports sont les suivants : raffinement technique accru des systèmes de transports découlant de l'escalation des coûts, et construction d'éléments dans les systèmes de transports qui s'éloignent du système traditionnel port–navire de surface.

Le raffinement accru du système port–navire de surface a entraîné une augmentation des coûts du système, de sorte que les opérateurs ont maintenant intérêt à se renseigner sur la construction et l'opération des systèmes. Une étude en cours est celle de plans pour un nouveau service de traversier entre North Sydney et Port-aux-Basques, Terre-Neuve, effectuée par le ministère des Transports. Les facteurs à considérer dans la mise au point du système sont des renseignements sur les vagues et les courants en

rapport avec la construction d'installations portuaires, et des estimés du temps où le traversier ne peut opérer à cause des vagues et des glaces. Ce dernier facteur affecte la construction du navire et les schédules d'opération. La construction de gares maritimes au large pour l'amarrage de grands pétroliers, celle de submersibles ou de semi-submersibles pour transporter le pétrole de l'Arctique et enfin celle de pipelines sur le fond de l'océan sont des exemples de nouveaux concepts dans le domaine des transports où les plans des systèmes peuvent être influencés par une connaissance des conditions des vagues, courants océaniques, température de l'eau, mouvement et disposition des sédiments et autres paramètres.

Dans le passé, les prévisions des conditions océanographiques n'ont pas joué de rôle substantiel dans la poursuite des opérations de transport maritime. Cependant, la navigation transocéanique a subi des transformations au cours de la dernière décennie, et les opérateurs sont intéressés à des traversées rapides, à de courtes durées des rotations, à des horaires rigides requis pour concurrencer les transports terrestres et finalement sécurité de la cargaison. Les prévisions de niveaux d'eau dans les ports, des courants océaniques et des vagues prennent de plus en plus de valeur pour la navigation et, là où ces services existent, ils sont de plus en plus utilisés. Le service de prévisions le plus avancé au Canada, autre que la prévision des marées, est celui de la prévision des conditions de glace dans le Saint-Laurent, le long de la côte du Labrador et dans l'Arctique, qui relève du Centre des glaces (ME). Ce service inclut des pronostics du temps de formation de la glace d'hiver et de la débâcle.

Les pêches

Historiquement parlant, le biologiste des pêches est celui qui a le plus souvent demandé des renseignements en océanographie physique dans le but de développer les pêches. On reconnut dès les débuts de la science des océans la dépendance de la vie marine sur les conditions physiques de milieu. Il y eut depuis un effort continu, par les pays du monde intéressés dans les pêches, pour comprendre les relations entre la biologie et la physique de l'océan. La taille des organismes marins varie des formes vivantes les plus petites, le plancton, dont la longueur est mesurée en millimètres, aux grandes baleines qui atteignent des longueurs de plusieurs dizaines de mètres. Toutes les caractéristiques physiques des océans connues présentement influent sur l'existence, l'abondance et la distribution de la vie marine : la lumière dans les couches supérieures, laquelle est nécessaire à la production primaire; la densité, la température et la salinité dans lesquelles une espèce a évolué; les courants qui déterminent la dérive des oeufs et des larves de poisson; et les processus de remontée d'eaux profondes, de turbulence, de convection et d'ondes internes qui entraînent vers les couches superficielles une eau riche en éléments nutritifs.

Les interactions sont complexes, et les échelles temporelles et spatiales de l'environnement physique que le biologiste des mers cherche à décrire couvrent une gamme allant d'heures à années et de mètres à des centaines de kilomètres. À des échelles plus petites, le biologiste est intéressé à la distribution irrégulière et aux fluctuations de la population planctonique et à leur relation avec la disponibilité du plancton comme nourriture des poissons plus grands, ce qui conduit à des études du taux de diffusion des plus petits éléments de la chaîne alimentaire et de la dépendance de ce taux sur la turbulence et la turbidité du milieu. Dans les anses, auxquelles on a accordé beaucoup d'attention au cours des dernières années, l'intérêt porte souvent sur les effets des polluants qui y pénètrent en provenance de la terre, ou sur les programmes expérimentaux élaborés dans le but de découvrir les raisons pour lesquelles une pêcherie particulière, telle que celle des huîtres, a décliné. Ces programmes nécessitent une description des propriétés physiques à grande échelle, telles que les caractéristiques de chasse d'eau de l'anse et les changements dans l'océanographie de l'anse qui se produisent sur une période de plusieurs années. Dans une application plus directe aux pêches, le biologiste a cherché à déterminer la relation entre l'abondance des espèces et les changements dans les conditions océaniques, telles que la température et la salinité, et à utiliser les conditions océanographiques prédominantes pour diriger l'opération des flottilles de pêche. Ici, le biologiste a besoin d'une description et, idéalement, d'une prévision des changements dans le régime des courants océaniques, des courants et températures sur les frayères et du mouvement des fronts océaniques.

Un autre aspect de la dépendance de la vie marine sur le milieu ambiant, qui nous inquiète de plus en plus, touche les changements produits par l'homme dans le milieu océanique. À l'heure actuelle, nous n'avons réussi à effectuer des changements que dans des endroits comme les anses, les ports et les petits détroits, souvent avec des conséquences désastreuses sur les organismes vivants de la région particulière, bien que les biologistes se rendent compte et s'inquiètent de plus en plus de répercussions possiblement plus étendues. Ceci ne nous empêche pas toutefois de viser à modifier les conditions météorologiques, produisant des changements importants dans le ruissellement des continents, et à entreprendre d'autres projets à grande échelle. Nous en connaissons suffisamment pour comprendre qu'une telle manipulation affectera les océans et par voie de conséquence, les pêches, mais pas assez pour prédire quelles seront ces changements. Dans certains cas, ces derniers pourront entraîner une revalorisation des pêches.

Ressources pétrolières et minérales

Il n'est pas facile d'évaluer la somme de connaissances des océans qui sera requise pour l'exploitation des ressources pétrolières et minérales du fond de la mer, car le développement de ces ressources en est encore aux premiers stades d'exploration. Le Canada a un intérêt prioritaire dans le développement d'un système de transport pour le pétrole et dans le contrôle de la pollution par les hydrocarbures. Nous examinons ces questions ailleurs dans le rapport. Au stade actuel d'exploration, plusieurs problèmes ont surgi qui ont amené des demandes d'information sur les courants océaniques, les vagues et la houle. Ces problèmes sont liés à la construction et à l'opération des installations de forage et au mouvement de la glace et des banquises dans les eaux où elles sont abondantes. Les demandes de renseignements à ce jour se sont limitées aux plateaux continentaux. On croit qu'il existe de grandes réserves, encore inconnues, de pétrole et de gaz sur la marge et sur la pente du plateau continental. Le forage en ces endroits est techniquement possible et leur exploration entraînera des demandes de renseignements sur une aire plus étendue.

Qualité de l'environnement

Une portion significative de l'effort en océanographie physique, au Canada comme ailleurs, est orientée vers l'évaluation des répercussions de la pollution. Qu'il s'agisse du rejet d'eaux usées dans une baie, d'un déversement accidentel d'huile d'un pétrolier ou de substances chimiques présentes dans le ruissellement, une connaissance des courants, des processus de mélange et de la diffusion joue un rôle clef dans l'estimation de la superficie et du degré de pollution. Un certain type de pollution résulte de polluants qui sont tout d'abord libérés dans l'atmosphère et ensuite assimilés dans l'océan à l'interface air–mer. Une évaluation de ce type de pollution implique les processus d'échange air–mer.

Les problèmes de pollution de beaucoup les plus nombreux sont ceux qui surgissent dans les anses côtières par suite de la concentration locale de la population ou d'installations industrielles. Chaque anse ayant ses caractéristiques de circulation propres, il faut presque toujours entreprendre une étude de l'océanographie de la région si l'on veut évaluer la dispersion du matériel dans l'anse. Ces évaluations absorbent une portion significative de l'effort consacré à l'océanographie physique des anses et des chenaux le long de la côte canadienne. Les problèmes ne sont plus limités aux côtes méridionales où il y a concentration de la population, mais englobent maintenant les chenaux et baies de l'archipel et de la côte septentrionale, par suite de développements pétroliers et minéraux, et de projets hydro-électriques tels que celui de la baie James. Presque toute la ligne de côte, avec sa grande variété de caractères océanographiques, est impliquée.

L'estimation du sort d'un polluant pénétrant dans l'océan ne doit pas se limiter à la région côtière. Déjà, l'exploration pétrolière donne naissance à des demandes d'évaluation des répercussions sur l'environnement de fuites de pétrole dans les eaux qui recouvrent le plateau continental, viz. le projet de la mer de Beaufort. On a de plus déversé des déchets hautement toxiques dans les profondeurs de l'océan. Nous ne sommes pas tout à fait en aussi bonne position pour évaluer le sort des polluants en pleine mer. L'anse côtière est petite et on peut entreprendre un programme sur le terrain et déterminer les caractéristiques particulières de circulation et de mélange. Nous sommes partiellement capables de faire une évaluation semblable dans les eaux côtières, mais quand il s'agit de dispersion en plein océan, cette évaluation doit se faire à partir de connaissances mises en commun par plusieurs pays.

Température et climat

Le plus grand défi auquel on a à faire face aujourd'hui est la possibilité de prédire le climat. Une réussite aura sans contredit des répercussions immenses sur l'amélioration et la gestion des approvisionnements mondiaux en nourriture. Par contre, un échec pourrait entraîner de sérieuses famines, tout simplement parce que nous ne pouvons prévoir les changements climatiques causant une diminution des récoltes ou des pêches. De plus, nous sommes maintenant au point où nous changeons le climat, soit délibérément soit accidentellement. La manipulation volontaire du climat se fait présentement localement à petite échelle, et a pour but de stimuler la pluie. On a des preuves que les changements accidentels qu'entraîne une manipulation du ruissellement ne sont pas si locaux, et que des changements permanents de climat se produisent. Parmi nos systèmes naturels, les rivières sont celles qui peuvent être manipulées le plus facilement, et un contrôle complet de l'écoulement mondial est tout à fait possible en rapport avec la production d'électricité, l'agriculture et le contrôle des inondations. Nous avons des raisons de croire que ceci produira des changements de climat. Des études récentes ont également démontré que si le rythme actuel de croissance de l'énergie libérée dans l'atmosphère se poursuit, des changements climatiques globaux pourraient se produire en un siècle ou à peu près. Cet avenir n'est pas tellement lointain si l'on considère le temps qu'il faudra pour effectuer les recherches qui nous permettront de prédire avec confiance de tels changements. Le Canada est riche en ressources renouvelables, agricoles et halieutiques, qui sont affectées par un changement climatique. De plus, sa position géographique est telle que des changements dans les océans peuvent entraîner des

changements de climat significatifs. La présence de la banquise dans l'océan polaire est un facteur majeur du climat canadien et mondial, et les conditions océanographiques dans les deux grands estuaires, la baie d'Hudson et le golfe Saint-Laurent, influencent le climat de l'est du Canada.

La présente poussée en météorologie est orientée vers le développement de modèles numériques pour les prévisions de la température. Les expériences internationales GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment) poursuivie en 1974 et FGGE (First Garp Global Experiment) prévue pour 1977–78 ont été spécifiquement organisées dans le but d'améliorer et d'éprouver les modèles. À cause de la nature de l'atmosphère, les prévisions de la température à l'aide de modèles ne semblent possibles que pour 2 ou 3 semaines à l'avance, et pour ceci, une description de la température présente de la surface de la mer est suffisante. Dans le cas d'études de climat à long terme, il faudra tenir compte des changements qui se produisent dans les océans, particulièrement du contenu calorifique des couches supérieures. À des échelles chronologiques plus longues, de plusieurs années, il faudra pouvoir prédire les changements dans les courants océaniques qui entraînent des changements dans la circulation atmosphérique. Pour y réussir, il est nécessaire de bien comprendre les interactions océan–atmosphère et de développer une forme quelconque de modèle combiné pouvant être utilisé pour des prévisions. C'est l'objectif du Programme de recherches atmosphériques globales, effectué sous les auspices de l'Association météorologique mondiale et du Conseil international des unions scientifiques. Bien des expériences océanographiques et météorologiques qu'on devra poursuivre si l'on veut faire des progrès dans la compréhension et la prédiction du climat se feront à grande échelle et seront dispendieuses, car il sera impossible pour une nation seule de les réaliser. Certaines de ces expériences se feront en pleine mer, loin des rives de toute nation. Le Canada a beaucoup à gagner de leur succès et, comme pays possédant un programme bien développé en océanographie physique, devrait s'attendre à y contribuer une part importante.

Autres usages

L'océanographie physique est utilisée à divers degrés pour la défense, la récréation et le développement de l'énergie. Les conditions de température et de salinité de l'océan déterminent le succès de la détection des sous-marins par des techniques acoustiques, et le développement du système canadien de sonar à profondeur variable, décrit plus haut, est le fruit de la description des conditions réfractives produites par la température au large de la côte orientale du Canada. Pour ses opérations, la Marine maintient des services océanographiques donnant des prévisions, 3 jours à l'avance, des conditions de température dans les couches superficielles.

Les océans possèdent de massives quantités d'énergie, et on a mis de l'avant divers projets pour l'utiliser. L'utilisation des marées comme source d'énergie est une réalité en France et une possibilité dans la baie de Fundy. Des projets de cette nature impliquent la construction de barrages ou quelque autre forme de modification du régime des courants. Il faut bien comprendre ces modifications au moment de la planification si l'on veut que l'opération réussisse. Il faut également estimer les changements dans le niveau de l'eau et dans les courants. Dans le cas de la baie de Fundy, on devra mesurer l'amplitude de la marée sur le plateau continental, à une grande distance des barrages proposés avant de pouvoir déterminer les changements qui se produiront dans la hauteur des marées de la baie. Des projets comme celui de l'utilisation de l'énergie du Gulf Stream manquent d'attrait pour le moment, mais nous ne pouvons rejeter la possibilité que l'énergie des océans sera exploitée à l'avenir. On pourrait utiliser cette énergie sans les problèmes de pollution qui accompagnent l'emploi des combustibles fossiles ou le rejet de matériel radioactif des réacteurs, mais les océans en seront quand même modifiés jusqu'à un certain point et d'une façon qui pourrait être soit à notre avantage soit à notre désavantage.

Recherches

Le secrétaire du Comité canadien d'océanographie a compilé la liste des océanographes physiciens au Canada pour 1974. La liste contient 86 scientifiques impliqués dans l'océanographie physique dans 23 institutions. Les universités en possèdent 20 et les organismes gouvernementaux 66. Des 23 institutions, il y en a 4 qui ont un personnel de plus de 5. Ce sont : l'Institut Bedford, 23; la Direction générale des sciences de la mer, Pacifique, 18; la Direction générale des sciences de la mer, Ottawa, 14; et l'Institut d'océanographie, Université de la Colombie-Britannique, 7. À ces quatre institutions sont rattachés 62 des 86 océanographes du pays, ce qui reflète la concentration d'océanographes sur les deux côtes qui s'est produite au cours de la décennie 1963–73, et l'établissement du Centre canadien de données océanographiques (maintenant élargi en un Service de données sur l'environnement marin) à Ottawa.

Lors de visites à ces institutions, nous avons fait une évaluation de l'activité à laquelle l'individu consacre à long terme la majeure partie de son temps. Les résultats sont les suivants :

Activité	Nombre d'individus
Vagues de surface et prévision des vagues	4
Marées et courants de marée	6
Interaction air–mer	4

Activité	Nombre d'individus
Processus à petite échelle (Turbulence, ondes internes et micro-structure thermique)	10
Modèles numériques	3
Dynamique des courants de profondeur	10
Dynamique des courants du plateau continental	0
Dynamique et courants des anses et chenaux (y compris le golfe Saint-Laurent et le détroit de Georgie)	21
Dynamique et courants de l'Arctique	9
Services de données (Ottawa) et prévisions synoptiques (Pacifique et Atlantique)	7
Administration et études de personnel	12

Certains océanographes sont impliqués dans plus d'une de ces activités. Cependant, ces chiffres reflètent l'attention qu'on donne aux divers aspects du programme.

Marées, tsunamis, ondes de tempêtes et vagues

Marées — L'élévation et l'abaissement du niveau de la mer sous l'influence de la marée dans les baies et les ports sont connus depuis les temps les plus reculés à cause de leur influence sur toutes les activités qui se poursuivent le long du rivage. À notre époque moderne, on tient compte de ce phénomène dans la construction des installations portuaires pour les océaniques, dans l'opération des bateaux de plaisance, dans les opérations de pêche et dans bien d'autres activités. On peut prédire avec précision les temps de marée haute et de marée basse, puisque les forces majeures responsables des marées, l'attraction gravitationnelle de la lune et du soleil, sont périodiques. Les heures de haute et de basse marées à différents endroits de la côte dépendent de la géométrie de la côte et ne peuvent être calculées avec précision à partir des oscillations de marée dans le bassin océanique à cause de la complexité des rivages. Cependant, des marégraphes permettant de mesurer l'élévation de la surface de la mer peuvent être facilement installés là où on a besoin de prévisions de marée. La hauteur locale de la marée peut être résolue en composantes périodiques liées au mouvement du soleil et de la lune, et l'amplitude de la marée prédite longtemps à l'avance. Au Canada, le Service hydrographique et le Service des données sur l'environnement marin (SDEM) font des observations à 130 stations de marégraphe permanentes. L'analyse des données est la responsabilité du SDEM, qui publie également des prévisions quotidiennes de marée à des ports de référence, ainsi que des bulletins hebdomadaires et mensuels de niveaux de l'eau dans le réseau du fleuve Saint-Laurent. Aux endroits où il n'y a pas de marégraphes permanents, on peut facilement prédire les hauteurs de marée à partir d'observations faites à des endroits où des marégraphes ont été installés temporairement.

L'élévation et l'abaissement de la surface de la mer résultent de courants de marée difficiles à observer et très variables selon la forme de la côte. Dans les chenaux étroits, les courants peuvent être forts et être un facteur à considérer dans la navigation. Dans les anses, les caractéristiques de chasse d'eau sont souvent déterminées par le régime des marées qui, à son tour, contrôle le taux auquel un polluant dans la baie se disperse vers la haute mer. Les courants de marée causent également un mélange, parfois intense, de l'eau dans une baie; ils jouent un rôle dominant de mélange dans la baie de Fundy et le détroit de Georgie. En fait, le régime des marées semble dominer l'océanographie physique de ces deux régions.

La théorie des marées n'est pas encore suffisamment complète pour permettre de prédire, sans observations concommittantes sur le terrain, la propagation des marées dans une baie et les courants de marée qui en résultent. De telles prévisions sont importantes quand la géométrie de la baie ou du chenal est modifiée par un barrage ou une chaussée. Il est possible d'estimer les changements de courants de marée et de niveaux d'eau en construisant des modèles hydrauliques à petite échelle, mais les problèmes de réduction limitent le succès et l'applicabilité de ce type de modèle, en particulier quand on doit tenir compte de la force de Coriolis due à la rotation de la terre. L'élaboration de modèles numériques du régime des marées laisse entrevoir la possibilité de prévisions beaucoup meilleures, mais les modèles requièrent un développement plus avancé, développement qui devra être appuyé d'un programme adéquat sur le terrain en vue de déterminer les niveaux d'eau et les courants. Dans le cas de la baie de Fundy, il faudra faire des mesures de hauteur des marées sur le plateau continental en dehors de la baie, avant de pouvoir prédire les changements dans le régime des marées que pourrait causer leur utilisation comme source d'énergie.

Une lacune majeure dans nos connaissances fondamentales des marées touche les marées des profondeurs océaniques. Ce n'est que récemment qu'on a développé et installé des marégraphes permettant de faire les observations nécessaires à grande profondeur sur le plancher de l'océan, alors qu'en Europe et aux États-Unis on fait des progrès dans le développement de modèles numériques des marées océaniques. Le problème est trop vaste pour qu'une nation puisse le résoudre seule, et il faudra un effort international.

Des études de marée furent entreprises assez tôt dans l'histoire de l'océanographie en Europe et aux États-Unis, mais se développèrent lentement au Canada avant 1960. La recherche sur les marées au Canada fut stimulée par le développement, pendant les années 1960, de prévisions numériques de la

hauteur des marées et par la production de tables des marées pour la côte canadienne par la Direction des sciences de la mer du ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources (maintenant Sciences océaniques et aquatiques, ministère de l'Environnement). Auparavant, ces prévisions étaient préparées par le Tidal Institute, Liverpool, Angleterre. On fait des recherches sur les marées à l'Université Dalhousie, sur la côte orientale, au Service de données sur l'environnement marin à Ottawa, à la section Sciences océaniques et aquatiques, région du Pacifique, et à l'Université de la Colombie-Britannique, sur la côte occidentale. À l'Université Dalhousie, on étudie surtout la théorie et les modèles numériques de marées dans les golfes et le refoulement de telles marées. Les études de courants de marée sur le terrain sont effectuées en collaboration avec le Laboratoire d'océanographie de l'Atlantique. Les travaux récents ont porté sur le développement d'un modèle numérique des courants de marée et des courants résiduels dans le bassin des Mines, en même temps que des observations sur les courants du bassin. Les modèles numériques en sont encore à leurs premiers stades de développement; ils ne permettent pas encore de faire des prévisions applicables au calcul de l'effet des barrages sur le système des courants, et ils ont besoin d'être développés davantage. Les recherches poursuivies à Ottawa ont surtout rapport avec le développement de techniques d'analyse des données de marée et la prévision des marées. On a également étudié les marées de la baie James et la possibilité d'utiliser les marées comme source d'énergie dans la baie d'Ungava. L'effet dominant du refoulement de la marée sur les systèmes de courants dans le détroit de Georgie et le détroit d'Hécate a incité les chercheurs de la côte occidentale à se concentrer sur les modèles numériques des courants de marée dans les détroits. Un groupe a été affecté à l'élaboration de modèles de ce genre pour la région du Pacifique, Sciences océaniques et aquatiques, et on poursuit un programme sur le terrain de mesure des niveaux de la mer et des courants.

La somme totale des recherches sur les marées a atteint un modeste niveau par des scientifiques compétents. La recherche est partagée entre les côtes et Ottawa au lieu d'être concentrée dans un seul institut, ce qui est considéré comme un avantage plutôt qu'un désavantage. Le service de prévision des marées pour le pays et la recherche requise pour développer des méthodes de prévision sont centralisés, ce qui laisse les programmes des côtes libres de se développer selon le type local de problèmes relatifs aux marées. On n'accorde pas beaucoup d'attention aux marées sur les plateaux continentaux. Il est possible que les marées jouent un rôle important dans les processus physiques à la marge des plateaux en convertissant l'énergie des marées en ondes internes (marées internes), et l'étude des marées devrait être élargie pour inclure de tels phénomènes. Il ne semble pas y avoir de raison particulière pour le Canada d'entreprendre des études sur les marées des profondeurs; par ailleurs, des études de ce genre, surtout les observations sur les marées de profondeur, doivent être effectuées par plusieurs pays en collaboration et nous devrions être prêts à y participer toutes les fois que la chose est possible, ne serait-ce qu'en contribuant le temps des navires à l'installation de marégraphes de profondeur.

Tsunamis — Les tsunamis et les ondes de tempêtes sont tous deux des oscillations transitoires de la surface de la mer pouvant causer des niveaux d'eau exceptionnellement élevés à la côte et des dommages considérables par inondation.

Les tsunamis ou « vagues de marée » sont le résultat de tremblements de terre ou d'éruptions volcaniques sur le plancher de l'océan. Ils se propagent à travers la cuvette océanique comme une série de crêtes se déplaçant à grande vitesse. Le tsunami d'Unimak consistait en une série de crêtes de 61 cm de hauteur séparées par des distances de 195.2 km et se déplaçant à une vitesse dépassant 640 km à l'heure. À mesure que la profondeur diminue à l'approche de la côte, la hauteur de la vague augmente. Les crêtes du tsunami d'Unimak atteignirent 16.8 m en Hawaii, et l'inondation causa des dommages matériels considérables et des pertes de vie. Les tsunamis se font sentir sur les deux côtes du Canada. Le tsunami résultant du tremblement de terre d'Alaska de 1964 se répandit vers le sud le long de la côte de la Colombie-Britannique, pénétrant dans les passages et fjords côtiers. Les crêtes dépassèrent en hauteur le niveau de haute mer et inondèrent les régions développées, causant des dommages estimés à 3 millions de dollars. La sévérité et la fréquence des tsunamis dans le Pacifique ont donné naissance à des recherches considérables sur les caractéristiques de leur propagation dans l'océan et sur la réponse des anses côtières à l'envahissement de la vague. Les recherches sur les tsunamis sont coordonnées par un Comité des tsunamis de l'Union internationale de géodésie et de géophysique. De plus, on a relié une série de marégraphes autour du Pacifique en un système permettant de détecter l'avènement d'un tsunami et d'être prévenu de son approche. La liaison entre les pays participants de même que les échanges de renseignements sur les méthodes et techniques d'observation sont assurés par la Commission océanographique intergouvernementale; les États-Unis assument la direction d'un Centre international de renseignements sur les tsunamis. Le Canada contribue au système par un contrôle à distance de marégraphes dans les inlets Tofino et Langara. Le Service de données sur l'environnement marin et le Service de l'environnement atmosphérique (SEA) poursuivent un programme conjoint d'études

théoriques, en particulier une étude de la réponse des anses au tsunami.

Le système d'alarme a été développé dans le Pacifique, à cause de la fréquence des tsunamis dans cet océan; on a enregistré cinq tsunamis majeurs depuis 1945. Ils peuvent également se produire sur la côte atlantique où, bien que peu fréquents, ils peuvent être violents. Le tremblement de terre sous-marin qui se produisit au sud de Terre-Neuve en 1929 donna naissance à un tsunami qui balaya la côte méridionale de Terre-Neuve et causa 21 pertes de vie et des dommages matériels considérables.

La recherche canadienne est de bonne qualité et à niveau raisonnable. On devrait continuer d'encourager les scientifiques canadiens à contribuer aux études internationales. Le système d'alarme et les recherches qui lui sont associées sont un des meilleurs exemples en océanographie de ce qui peut être réalisé par les nations vers la solution d'un problème commun.

Ondes de tempêtes — Les ondes de tempêtes sont causées par l'action de vents violents et d'anomalies de pression atmosphérique. L'élévation du niveau de la mer qu'elles produisent sur la côte peut durer une journée ou plus et causer des inondations sérieuses. Les pays européens s'intéressent depuis déjà quelque temps aux études d'ondes de tempêtes et à leur prévision, car de telles ondes sont une menace continuelle par suite de la faible élévation de plusieurs pays bordiers. Les ondes de tempêtes n'ont pas d'effet aussi dramatique le long de la côte canadienne, mais étant donné le développement d'énergie hydro-électrique dans des endroits comme la baie James et autres développements côtiers, on est justifié d'entreprendre des recherches sur les ondes de tempêtes et sur les méthodes de prévision à partir des prévisions météorologiques. À l'heure actuelle, le SEA et la section Sciences océaniques et aquatiques, région du Pacifique, sont à développer des modèles numériques et des méthodes de prévision d'ondes de tempêtes dans la mer de Beaufort; le SEA et le SDEM ont entrepris des études théoriques sur les ondes de tempêtes dans la baie d'Hudson et à d'autres endroits de la côte. Il est possible qu'on devra accorder plus d'attention à ce domaine de recherches à l'avenir.

Vagues superficielles — Les renseignements sur les vagues et la recherche sur leur formation font partie du programme océanographique canadien, qui s'est développé à un rythme remarquable au cours des cinq dernières années. Il en est de même des demandes de renseignements sur les vagues. Le SDEM a joué un rôle de premier plan dans la dissémination de l'information et l'évaluation des usages de cette information. On se rend compte des besoins de renseignements sur les vagues en examinant les demandes que ce service a reçues.

Sur une période de 9 mois, soit d'octobre 1973 à juin 1974, le SDEM a reçu environ 60 demandes de données sur les vagues (lacs non compris). Trente-et-une de ces demandes donnèrent les raisons, qui peuvent se grouper comme suit :

Construction de structures à la côte :	
Ports	5
Ports pour petites embarcations	5
Construction et opération de navires (Traversiers, navires, aéroglisseurs, etc.)	5
Construction et opération de structures en mer (Installations de forage, de puits de pétrole, gares maritimes en mer)	7
Recherches sur les caractéristiques des vagues	6

Le SDEM est intéressé surtout à fournir des données climatologiques sur les vagues, i.e. les conditions moyennes et extrêmes dans une région, qui serviront dans la construction de structures, de routes et dans l'établissement d'horaires. De plus, le Centre météorologique et océanographique des Forces canadiennes (METOC-FC), Atlantique, situé à Halifax, fournit des prévisions des conditions de vague dans le golfe Saint-Laurent et le long de la côte de l'Atlantique pour le bénéfice de la Marine, de la navigation commerciale et des bateaux de pêche.

Les opérations du SDEM, qui commencèrent en 1969, sont le fruit d'une étude conjointe poursuivie avec le ministère des Travaux publics. Ces opérations consistent à établir une série de bouées montant sur la lame le long de la côte et servant à mesurer la période et la hauteur des vagues, et à obtenir des données climatologiques sur les conditions de vague le long de la côte. S'étant procuré l'outillage nécessaire pour mesurer les vagues et maintenant capable d'évaluer les conditions de vague, le SDEM s'est vite trouvé impliqué dans plusieurs projets à court terme visant à évaluer les conditions de vague pour des buts spécifiques. Le nombre de ces projets a augmenté régulièrement et continue d'augmenter. À l'heure actuelle, le SDEM continue l'opération de ce service et a établi de plus 25 stations comme partie d'une étude à plus long terme sur le climat des vagues le long des côtes orientale et occidentale. Trois de ces stations sont situées sur des installations et des navires de forage. Les vagues de surface peuvent également être estimées à partir des vents de surface. La méthode n'est pas satisfaisante dans les ports et les petites nappes d'eau, mais peut être appliquée en haute mer. Un projet visant à développer des méthodes de rétrospection et à déterminer le climat des vagues à partir du champ du vent est présentement à l'étude par le SEA en collaboration avec le SDEM, qui est à développer un aperçu mensuel du climat des vagues pour l'Atlantique Nord-Ouest. À cause des changements, d'une année à l'autre, dans les conditions du vent et des vagues, il s'écoulera plusieurs années avant que les estimés ne deviennent fiables, et ces derniers devront être vérifiés par des mesures sur le terrain.

Les prévisions de vague sur base chronologique réelle pour l'Atlantique Nord-Ouest fournies par le METOC-FC, Atlantique, sont fondées sur les prévisions des conditions hémisphériques préparées par le United States Fleet Numerical Weather Center, Monterey, Calif., et sur des rapports de mer et de houle des navires. À partir de ces deux sources, le METOC prépare des prévisions jusqu'à 36 h à l'avance. Le service est nouveau et les techniques devront être éprouvées, car les rapports de mer et de houle provenant des navires en mer sont fondés en grande partie sur des observations visuelles, avec les erreurs inhérentes à ce type d'observations. De plus, les techniques de prévision des vagues à partir du champ du vent sont loin d'être parfaites.

Les prévisions des vagues dépendent de la précision avec laquelle le champ du vent est prédit et des techniques utilisées pour les prévisions. La physique du développement d'un champ de vagues sous l'action du vent est encore mal comprise. Il est donc possible d'améliorer les prévisions tant par des pronostics météorologiques plus précis que par des études plus poussées sur la génération des vagues. Le Laboratoire océanographique de l'Atlantique, en collaboration avec des scientifiques d'autres pays, étudie la génération et les propriétés statistiques des vagues. On a organisé une expérience internationale, la Joint North Sea Wave Experiment (JONSWAP), dans le but d'améliorer les techniques de prévision des vagues, et le Laboratoire océanographique de l'Atlantique y participe. Cette expérience, ou plus précisément cette série d'expériences, est un autre exemple de l'utilité de la coopération internationale dans la solution d'un problème commun à tous les pays et dans la découverte de techniques pouvant être utilisées par un pays individuel pour fournir des services.

Dynamique et circulation

Les systèmes dynamiques des océans, chenaux et anses sont constitués de mouvements dont l'échelle s'étale de quelques centimètres à des milliers de kilomètres. À l'extrémité supérieure de l'échelle se trouvent les tourbillons, actionnés par le vent, des bassins océaniques et la circulation thermohaline des océans, avec échelles spatiales de milliers de kilomètres et échelles chronologiques allant d'années à plusieurs siècles. À l'autre extrémité de l'échelle, celle allant de centimètres à mètres et de secondes à heures, se trouvent la turbulence, les vagues internes et autres types de mouvement à petite échelle.

La dernière décennie a vu le progrès s'accélérer dans la description de ces mouvements grâce à une instrumentation moderne. Il reste encore beaucoup à faire avant que soit bien comprise la physique des interactions entre les différentes échelles, et les mouvements et leur action devront être suffisamment bien exprimés sous forme mathématique pour permettre des prévisions.

Phénomènes à petite échelle — La turbulence, les vagues internes, la micro-structure thermique et autres processus à petite échelle se prêtent à une étude par des scientifiques seuls ou en petite équipe, pourvu qu'ils aient une instrumentation adéquate à leur disposition. Il se fait présentement des recherches à l'Institut d'océanographie, Université de la Colombie-Britannique; à la section Sciences océaniques et aquatiques, région du Pacifique; au Conseil de recherches pour la défense, Pacifique (CRDP), tous situés sur la côte occidentale; et au Laboratoire océanographique de l'Atlantique sur la côte orientale. Le programme est une extension des travaux du début de l'Institut d'océanographie, Université de la Colombie-Britannique, et du Laboratoire naval du Pacifique (maintenant CRDP), et a toujours été d'un haut calibre et internationalement reconnu.

Ces processus à petite échelle constituent les mécanismes par lesquels la chaleur échangée avec l'atmosphère est distribuée à travers la couche superficielle de l'océan et par lesquels les polluants sont dispersés. Une compréhension de ces processus est essentielle à la prévision des changements de climat et de température lorsqu'il s'agit d'estimer les niveaux de pollution des substances pénétrant dans les océans. On ne fait que commencer à reconnaître certains effets des processus à petite échelle, en particulier ceux qui influent sur la vie marine. Des études comme celle de la relation entre le phytoplancton, la turbulence et la micro-structure thermique, n'en sont pas plus qu'au stade d'exploration.

Comparativement aux autres parties du programme océanographique canadien, la recherche sur les processus à petite échelle est assez bien développée. Il est difficile de décrire ces processus expérimentalement et théoriquement, et si le Canada veut faire des progrès dans ce domaine, il lui faudra maintenir un programme de recherches du même calibre que celui qui existe présentement. La première condition pour l'avenir est de s'assurer que le travail se poursuit au même niveau de compétence.

La zone côtière — Les recherches sur la dynamique et les caractéristiques physiques des anses et des chenaux le long de la côte sont l'aspect le plus hautement développé du programme océanographique canadien et représentent environ la moitié de l'effort canadien total. Ceci est facile à comprendre. C'est dans ces régions que nous construisons des chaussées et des brise-lames qui modifient les courants, que les effets des polluants entrant dans l'océan sont visibles et parfois désastreux pour la vie marine locale, et que nos connaissances des courants, vagues et marées sont nécessaires à la planification de structures côtières.

Les caractères morphologiques de la plupart des anses situées sur les côtes orientale et occidentale sont connues. Plusieurs ont été visitées, particulièrement sur la côte occidentale, et il existe au moins une description rudimentaire de la température et de la salinité dans ces anses. On comprend dans leurs grandes lignes les forces qui engendrent la circulation et le type de courants et de chasse d'eau des anses et des chenaux, mais pas suffisamment toutefois pour décrire les conditions à l'intérieur d'une anse particulière sans une étude préalable sur le terrain. Chaque anse et chenal ont leurs propres caractéristiques qui dépendent de la forme, de la topographie du fond, des vents locaux, de l'écoulement et des caractères de l'océan à l'entrée. Sur les deux côtes, on a fait des progrès dans la classification des anses selon leurs caractères généraux, de même que dans l'étude détaillée de quelques anses et chenaux. Cependant, il reste encore beaucoup de travail expérimental et théorique à faire avant de bien comprendre les changements dans l'océanographie des anses et des chenaux résultant de changements dans les conditions météorologiques et océaniques, et d'installations érigées par l'homme. Je discute plus bas des anses et des chenaux de l'Arctique.

Les quatre plus grandes masses d'eau à demi-fermées sur nos côtes sont le golfe Saint-Laurent et la baie d'Hudson sur la côte orientale et le réseau des détroits de Georgie et Hécate sur la côte occidentale. Ce sont des masses d'eau de grande étendue. Elles devront être étudiées de façon intensive si elles doivent être décrites suffisamment en détail pour fournir le type de renseignements requis pour la gestion des pêches et le contrôle de la pollution dans leurs eaux. À cause de leur grande étendue, leur étude prend plutôt l'aspect de recherches sur une petite mer plutôt que sur une anse ou un chenal. On poursuit depuis plusieurs années des recherches dans le détroit de Georgie et dans le Saint-Laurent. On a maintenant atteint le stade où les océanographes croient pouvoir entreprendre des études à grande échelle des principales caractéristiques de la circulation dans un programme qui inclut à la fois la théorie et l'expérimentation. Les profits à retirer de telles études sont évidents. Les deux régions sont grandement utilisées pour les pêches et le transport, elles sont très accessibles à la pollution et ont besoin d'être gérées. De plus, les deux régions sont suffisamment étendues, sans l'être trop, pour que l'étude de la dynamique à échelle modérément grande, y compris interactions des couches limites, puisse réussir et que les connaissances acquises aient une grande valeur. On a mis de l'avant des propositions pour les deux projets, qui ont reçu récemment l'approbation du Cabinet. La baie d'Hudson a été plutôt négligée. Nos connaissances de ses températures et salinités sont fondées sur des données cueillies en été, et celles de ses courants sur quelques expériences de bouteilles dérivantes effectuées également en été. Ceci a pu être acceptable dans le passé, mais l'industrie s'est déplacée vers le nord et des développements hydro-électriques d'envergure sont en cours sur ses rives (baie James) qui en changent l'écoulement. Les effets sur l'écologie locale et sur les caractéristiques océanographiques pourraient être significatifs. S'il se produit des changements dans l'océanographie physique de la baie d'Hudson, il en résultera un changement dans le climat, car la baie est suffisamment étendue pour que les changements dans l'échange thermique avec l'atmosphère soient significatifs. Malheureusement, la modification de l'écoulement se poursuit sans qu'on fasse trop d'effort pour décrire les caractéristiques de l'océanographie et pour produire une série de données de base permettant de déterminer, par comparaison, les changements que ces développements entraînent.

L'action des vagues et des courants sur la côte est un aspect de l'océanographie côtière auquel on a accordé peu d'attention au Canada. On serait justifié de consacrer un effort substantiel à un programme de recherches visant à une compréhension des processus en jeu. Un tel programme devrait inclure des travaux sur la sédimentation marine, le mouvement des sables et du gravier sous l'action des vagues et les systèmes de vagues et courants qui sont engendrés à la ligne de côte. Les lois régissant le transport des sédiments doivent être développées davantage. Une partie du travail pourrait se faire dans des modèles de laboratoire, mais il faudra compléter par des observations soigneusement planifiées sur le mouvement des sédiments dans la nature. Il faudra également étudier les courants littoraux engendrés par les vagues de surface, les ondes internes, etc. Ces travaux impliqueraient des programmes sur le terrain nous permettant de mieux comprendre la physique fondamentale des courants. Des travaux de ce genre sont poursuivis par des scientifiques individuels dans différents laboratoires du Canada, mais ils ne représentent pas un programme bien développé. L'Institut national de la recherche scientifique, section océanologie, Université du Québec à Rimouski, se propose de mettre sur pied un programme d'études des processus du littoral. L'importance des processus de sédimentation n'est pas limitée à la côte. Les bassins océaniques sont des bassins de sédimentation, et le gradient en pente douce du plancher abyssal au plateau continental est une caractéristique sédimentaire. Les foraminifères des sédiments représentent des records chronologiques des caractéristiques des océans plusieurs siècles en arrière, et qui, si nous pouvons les interpréter, nous permettraient de mieux comprendre les caractères climatiques à grande échelle, tels que les périodes glaciaires. Les processus de sédimentation marine mériteraient une part plus substantielle du programme de recherches, du point de vue des processus des côtes et des mers profondes.

Le sujet devrait être réexaminé des points de vue géologique et océanographique, car le présent rapport n'y touche que de façon très sommaire.

Les recherches sur la dynamique et la circulation des eaux de la zone côtière se poursuivent à un niveau raisonable au Canada. Le problème auquel nous avons à faire face provient du fait que ce sont dans les anses et les chenaux qu'il nous faut effectuer des relevés spéciaux par suite d'une utilisation accrue de la côte et aussi de l'appui à apporter aux études biologiques. Ces études impliquent ordinairement au moins un scientifique et plusieurs techniciens. Certains programmes se prolongent sur de longues périodes et requièrent plus de personnel. L'étude du détroit de Pendrill sur la côte occidentale par exemple, entreprise à la suite de la disparition de la récolte entière de larves d'huître en 1971, requerra environ 2 années de travail, y compris le rapport final, et implique environ 10 scientifiques et techniciens. Ceci représente une partie substantielle de l'effort de la section Sciences océaniques et aquatiques, région du Pacifique, en océanographie côtière. Ces relevés se font au détriment d'études à plus long terme des processus de la zone côtière qui ne peuvent être négligés, et on devrait trouver des moyens de remédier à une situation qui ne peut qu'aller en empirant. Une possibilité est de développer au sein de l'industrie la capacité de faire ces relevés. Dans la plupart des cas, les objectifs et les exigences du relevé peuvent être énoncés assez clairement, et le temps requis pour l'effectuer assez court pour qu'ils puissent être l'objet d'un contrat. Comme plusieurs de ces relevés ont pour but de fournir une réponse immédiate à un problème pratique, les techniques et analyses ne peuvent être que contemporaines, et ces dernières peuvent être utilisées par un océanographe physicien compétent secondé par une équipe technique appartenant à l'industrie. Les relevés de ce genre peuvent se faire sans grand navire de recherches et sans l'instrumentation dispendieuse requise pour les travaux en eau profonde.

Les océans et eaux des plateaux continentaux — Les recherches sur la dynamique des régimes de courants des bassins océaniques ont avancé rapidement durant la dernière décennie. Ces recherches ont dépassé le stade où les croisières en vue d'étudier les courants et phénomènes associés étaient en grande partie exploratrices. Les principales caractéristiques des courants océaniques ont été portées sur cartes à partir de la distribution des températures et des salinités, et un certain progrès a été accompli dans la description des phénomènes à petite échelle, tels que les tourbillons enfouis dans le flux moyen, les contre-courants et les caractéristiques des régions de remontée d'eaux profondes. Des bouées capables de porter des courantomètres ont été mises au point au début des années 1960 en même temps que les diplômés des écoles d'océanographie établies durant les années 1950 commencèrent à exercer une influence sur la recherche océanographique. Ces diplômés sont bien familiers avec la mécanique des fluides, les outils sont disponibles pour installer un réseau de détecteurs dans l'océan, et l'océanographie des mers profondes entre graduellement dans une ère d'expériences délibérées dans le but d'étudier les caractères dynamiques particuliers du système de courants.

Les études les plus importantes du Canada sur la circulation océanique se poursuivent au Laboratoire océanographique de l'Atlantique, Institut Bedford, et portent surtout sur des travaux théoriques et expérimentaux en Atlantique Nord. Sans être très étendu, le programme représente quand même une contribution canadienne aux études expérimentales et théoriques des océans. Très peu de travaux se font dans le Pacifique. Il n'y a toutefois pas lieu de s'inquiéter pour le moment de ce déséquilibre, entre l'Atlantique et le Pacifique, de l'effort consacré par le Canada aux caractères à grande échelle de la circulation. Les études de la circulation océanique sont dispendieuses et requièrent de grands navires de recherches. Les programmes expérimentaux impliqués sont d'une telle envergure qu'une coopération internationale est essentielle. Présentement, l'effort international consacré à la circulation océanique est concentré surtout en Atlantique Nord, et il en sera ainsi pour un avenir prévisible. Éventuellement, cependant, le Pacifique devra être étudié plus intensivement qu'il ne l'est maintenant, et le Canada devra se préparer à supporter un programme dans cet océan.

Un domaine de recherches océaniques peu développé dans le programme canadien est l'application des méthodes numériques aux problèmes de circulation. Le développement de techniques numériques a fourni aux océanographes un nouvel outil puissant permettant d'étudier et de quantifier des modèles des océans. C'est un champ qu'il ne faudrait pas négliger. Présentement, l'élaboration de modèles à grande échelle des grandes masses d'eau semi-fermées, telles que le golfe Saint-Laurent, est erratique et l'oeuvre de scientifiques individuels qui n'y consacrent qu'une partie de leur temps. On n'essaie pas de produire des modèles à l'échelle des océans. Les océanographes sont loin derrière les météorologistes en ce qui concerne le développement de modèles numériques. Comme exemple, les météorologistes ont formé un groupe de 15 chercheurs à Montréal chargés de développer des modèles atmosphériques pour la prévision de la température. M. le professeur S. Pond de l'Université de la Colombie-Britannique a préparé une revue du potentiel des modèles numériques.[8] Le professeur Pond en vient à la conclusion que le développement de modèles est suffisamment promet-

[8] Pond S. 1975. Numerical modelling of ocean circulations. J. Fish. Res. Board Can. 33 : 1434–1450.

teur pour que l'achat d'un ordinateur de 10 millions de dollars soit aussi profitable que l'acquisition d'un nouveau navire de recherches. Il ne faudrait pas prendre cette conclusion à la légère. Les modèles numériques sont peu développés en océanographie canadienne, en partie parce que les scientifiques qui auraient pu se spécialiser dans ce domaine n'ont pas eu accès à des ordinateurs. Il n'est pas trop tôt pour le Canada pour mettre sur pied un programme de modèles numériques plus substantiel. Au début, les modèles seront plutôt grossiers, mais des modèles, même grossiers, peuvent nous aider à détecter les lacunes dans nos connaissances de la physique fondamentale de l'océan et à nous éclairer sur le type de réseau d'observations qui seront requises pour fins de description et de prédiction. Au départ, on pourra établir un groupe sur la côte orientale chargé de développer des modèles de circulation à grande échelle comme partie du programme d'observations et d'études théoriques déjà en place. Le groupe devra avoir accès à l'ordinateur du SEA à Montréal. Il devra également coopérer avec les météorologistes étudiant des problèmes semblables dans l'atmosphère, car la prévision des tendances dans le climat et des changements à long terme dans l'océan dépendra d'une meilleure compréhension des interactions océan-atmosphère. Nous en discutons plus bas. À la périphérie des tourbillons océaniques majeurs se trouvent des systèmes de courants qui agissent sur les plateaux continentaux et dans leur voisinage. Ces systèmes doivent réagir aux changements dans la circulation océanique à grande échelle. Il y a cependant peu de progrès de fait dans la compréhension de cette réaction, peu d'effort en vue d'étudier les détails des courants et aucun développement de la théorie de la dynamique des systèmes des plateaux continentaux. Ce domaine est probablement celui qui est le plus négligé en océanographie. Au Canada, la raison en est que nous n'avons pas de programme, ni sur une côte ni sur une autre, orienté vers la compréhension de l'océanographie des eaux des plateaux continentaux. Il se fait pourtant des travaux. On entreprit, lors de l'expédition *Hudson* 70, des observations sur la structure des températures et des salinités sur le plateau continental de la mer de Beaufort comme complément à des études de foraminifères. La section Sciences océaniques et aquatiques, région du Pacifique, poursuit dans la même région un programme beaucoup plus étendu en vue d'évaluer les répercussions de l'exploration pétrolière sur l'environnement. Des études semblables de courte durée ont été effectuées sur le plateau continental de l'est, mais on ne voit nulle part un élan bien net vers des observations et des études théoriques du système du plateau continental. Nos pêcheries majeures se pratiquent sur les bancs et le long des marges des plateaux continentaux, et s'est également dans ces régions que se fait l'exploration pétrolière avec tous les risques de déversements accidentels d'huile qu'elle comporte. Toute évaluation et prédiction des répercussions sur les pêches des changements dans l'environnement ou de la dispersion des nappes d'huile nécessite une connaissance des caractères océanographiques beaucoup meilleure que celle que nous possédons présentement. Notre manque à étudier les courants et autres processus physiques, tels que les marées internes et les ondes à longue période qui se produisent sur les plateaux, est une importante lacune dans le programme canadien.

L'archipel Arctique canadien et l'océan Arctique — Jusqu'à très récemment, nos connaissances des caractères océanographiques des chenaux et des anses de l'archipel étaient limitées à la distribution des températures et des salinités accumulées à la suite d'observations des brise-glaces dans l'archipel et sur des îles de glace dans l'océan Polaire. Ces observations suffisent à nous donner une assez bonne description des caractéristiques générales de température et de salinité de l'archipel et de l'océan Polaire. Le régime des courants a été en grande partie estimé par des calculs géostrophiques à partir des températures et des salinités. On a fait quelques observations directes sur les courants, mais elles sont relativement rares.

Dans l'océan Arctique, les données et les techniques nous donnent un tableau général de la circulation, mais il existe très peu d'observations significatives sur les caractères à petite échelle, tels que les remous. Par contraste, on sait qu'il existe dans l'Atlantique des remous dont l'échelle est de plusieurs centaines de kilomètres, et les travaux sur ces phénomènes ont progressé au point que le rôle des remous dans la dynamique de la circulation générale est présentement étudié à la fois théoriquement et sur le terrain à l'aide de batteries de courantomètres. Tout ce que nous savons au sujet de l'océan Arctique provient d'observations faites sur des îles de glace par des scientifiques américains, qui indiquent l'existence de remous ou de phénomènes ressemblant à des remous. L'échange d'eau avec le Pacifique se fait par le détroit de Béring. Le détroit est peu profond et l'échange est limité. L'échange avec l'Atlantique se fait en partie par l'archipel canadien où les calculs de courants à partir des données existantes démontrent qu'il y a faible mouvement d'eau de l'Arctique à l'Atlantique. Il se produit un échange beaucoup plus considérable entre l'océan Arctique et l'Atlantique par la mer Norvégienne à l'est du Groenland. Pour les eaux plus profondes que quelques centaines de mètres, c'est la seule voie. C'est donc cette entrée de l'océan Arctique qui doit être étudiée si l'on veut comprendre l'échange d'eau majeur entre l'océan Arctique et les autres océans du monde.

Les chenaux de l'archipel ne sont peut-être pas des passages importants pour l'échange d'eau entre les océans Arctique et Atlantique. Par ailleurs, quand

on examine ce que nous connaissons des courants dans les chenaux de l'archipel, et essayons d'en estimer les vitesses et directions locales en rapport avec l'emplacement de pipelines par exemple, nous nous rendons compte que les mesures directes de courant essentielles à cette fin manquent et que notre connaissance de la dynamique des courants dans les chenaux est inadéquate. Il en est de même des caractères particuliers, tels que les mécanismes de chasse d'eau, des anses de l'archipel. L'expérience acquise à la suite d'études des anses à des latitudes plus tempérées ne peut être que partiellement appliquée à l'Arctique, étant donné que l'anse arctique est recouverte de glace durant la majeure partie de l'année, ce qui produit des caractéristiques particulières. Des travaux récents effectués par la section Sciences océaniques et aquatiques, région du Pacifique, par exemple, ont démontré que le vidage, une fois par année, des baies arctiques peut se faire très rapidement, en dedans d'une semaine, et que durant la majeure partie de l'année la couverture de glace empêche le mélange des eaux de surface sous l'action du vent. Ces deux processus sont des aspects importants de l'aptitude des eaux d'une anse à disperser les polluants.

Les programmes sur le terrain dans l'Arctique causent des problèmes particuliers à la région. La plupart des chenaux de l'archipel et de la partie méridionale de la mer de Beaufort ne sont accessibles à des navires utilisant des techniques conventionnelles que durant une courte saison d'été. L'océan Arctique, le plateau continental bordant le nord-ouest de l'archipel et les chenaux du nord-ouest sont bloqués par la glace à l'année longue. Comme résultat, les observations d'hiver sont rares. On a développé des techniques spéciales, utilisant des îles de glace et des traîneaux, pour mettre l'équipement en place. L'équipement lui-même doit être spécialement construit pour fonctionner dans les conditions arctiques.

La plupart des institutions océanographiques canadiennes ont joué un rôle dans le développement de nos connaissances océanographiques de l'archipel et de l'océan Arctique. Les trois laboratoires les plus impliqués présentement dans l'étude des courants et de la structure des eaux sont la section Sciences océaniques et aquatiques, région du Pacifique; le Centre de recherches pour la défense, Ottawa; et le Centre des sciences marines, Université McGill. L'effort n'est pas sans importance, représentant environ un septième de l'effort total. On a fait beaucoup de progrès dans le développement et la mise en place d'équipement moderne pour mesurer les courants et autres paramètres. Le programme visant à mieux connaître les régimes de courants dans l'archipel avancent lentement mais sûrement. Comme dans le cas de la zone côtière, les demandes se font de plus en plus nombreuses pour entreprendre des études et des relevés spéciaux en vue d'évaluer les répercussions sur l'environnement. Comme l'effort disponible est limité, le programme de recherches fondamentales pourrait être très rapidement absorbé au détriment de notre aptitude future à comprendre l'Arctique et à y opérer. Rien n'empêche l'industrie de devenir compétente à effectuer des relevés dans l'archipel comme d'ailleurs dans la zone côtière. Si l'industrie ne peut y arriver, il faudra augmenter l'effort des laboratoires fédéraux et des universités pour leur permettre d'entreprendre des études d'évaluation du milieu.

Océans et atmosphère

Les océanographes et les météorologistes ont longtemps cherché à prédire les changements qui se produisent dans les océans et dans l'atmosphère. Les bénéfices à retirer de telles prévisions sont immenses et il n'y a pas lieu d'élaborer ici. On a des prévisions météorologiques depuis plus de 100 ans. Elles débutèrent avec l'assemblage de cartes synoptiques d'observations en surface de la température, de la pression et du vent, rendues possibles par l'avènement de la télégraphie. Au début, les pronostics de la température 1 ou 2 jours à l'avance se développèrent par la mise sur cartes synoptiques des conditions présentes et prédiction empiriques des changements à la lumière du comportement passé des systèmes météorologiques. L'avènement de l'ordinateur après la Seconde guerre mondiale donna au météorologiste un outil lui permettant de faire des prévisions numériques fondées sur les équations mathématiques régissant le mouvement de l'atmosphère. Depuis, on a développé des modèles numériques de l'atmosphère, grâce auxquels on espère fournir des prévisions jusqu'à 2 ou 3 semaines à l'avance. Le météorologiste a pu se poser franchement des questions telles que « jusqu'à quel point la température est-elle prévisible? », et étudier le type de réseau d'observations requises pour appuyer le système de prévisions. Les modèles ont également conduit à une meilleure compréhension des processus physiques qui se produisent dans l'atmosphère et qui ont besoin d'être compris si l'on veut faire des prévisions à long terme.

Le Programme de recherches atmosphériques globales, établi en 1967 par l'Organization météorologique mondiale et le Conseil international des unions scientifiques, a comme premier objectif « d'étudier ceux des processus physiques dans la troposphère et la stratosphère qui sont essentiels à la compréhension du comportement transitoire de l'atmosphère et qui se manifestent sous forme de fluctuations à grande échelle contrôlant les changements de température : ceci contribuerait à une précision accrue des prévisions sur des périodes allant d'un jour à plusieurs semaines. » On a déjà fait beaucoup de progrès vers la réalisation de ce premier objectif. On a développé des modèles globaux de l'atmosphère et, en 1977–78, une expérience à

l'échelle mondiale, la « First GARP Global Experiment », sera entreprise dans le but de fournir les observations nécessaires à la vérification des modèles. L'apport de données océanographiques requises pour atteindre le premier objectif n'est pas très grand, simplement une description synoptique de la température à la surface de la mer, spécifiant la limite inférieure initiale du flux thermique et qui n'a pas besoin d'être mise à jour puisque le modèle couvre toute une période de prévision. Les températures de l'océan à l'échelle impliquée changent relativement lentement, par comparaison avec le mouvement des systèmes météorologiques. On peut donc les considérer comme constantes sur la courte période d'une semaine ou deux. Même cette simple description synoptique peut être difficile à produire.

Bien que les changements à grande échelle dans l'océan se produisent assez lentement pour qu'ils n'aient pas d'importance pour les prévisions météorologiques à court terme, la précision des pronostics de température a un effet significatif sur notre aptitude à prédire les caractères océanographiques à petite échelle. Les conditions à l'intérieur d'une anse peuvent réagir en quelques heures à des changements dans le champ du vent, et les champs de vagues en plein océan se forment en réponse aux systèmes de tempêtes qui les balayent. Une amélioration des prévisions de la température entraînera une meilleure prévision de ces phénomènes, pourvu qu'on ait une compréhension adéquate de l'action à court terme de l'atmosphère sur le système océanique. Le problème de la génération des vagues par exemple, a été examiné ailleurs dans ce rapport.

Le second objectif du GARP est « d'étudier ceux des processus dans la troposphère et la stratosphère qui sont essentiels à la compréhension des facteurs déterminant les propriétés statistiques de la circulation générale de l'atmosphère et qui conduiraient à une meilleure compréhension du fondement physique du climat. » À ces études des processus dans la troposphère et la stratosphère, on doit ajouter des études des processus dans l'océan, si l'on veut que la prédiction du climat devienne une réalité. Des études ont déjà démontré une corrélation entre les anomalies de températures superficielles de la mer de 1–3 C sur de vastes étendues et des changements dans les systèmes météorologiques, sur une échelle chronologique de mois et d'années. Pour passer de ce stade à une forme quelconque de modèle de prévision du climat, il faudra faire un effort déterminé en vue de comprendre la physique fondamentale des interactions entre l'atmosphère et l'océan. Les flux énergétiques, le rayonnement, la vapeur d'eau et la quantité de mouvement à travers l'interface océan-atmosphère devront être étudiés. Pour des échelles chronologiques plus courtes, soit de mois, on devra inclure l'interaction de la couche supérieure de l'océan. À mesure que nous progressons vers de plus longues échelles chronologiques, le transport de la chaleur par advection dans les couches supérieures prend plus d'importance, et sur des échelles couvrant des siècles, l'océan entier sera impliqué. Les progrès dans la compréhension et la prévision du climat marcheront très probablement de pair avec les progrès dans la compréhension et la prévision des caractéristiques climatologiques de l'océan, telles que les changements dans la température de la couche superficielle ou les changements dans les systèmes de courants. Ce sont précisément ces changements qu'on essaie de découvrir dans les études sur les répercussions de changements à grande échelle dans le milieu océanique sur les pêches et les stocks de poissons. Nous avons donc tout autant intérêt à comprendre l'atmosphère pour prédire les changements climatologiques dans les océans qu'à comprendre l'océan pour prédire les changements climatiques dans l'atmosphère.

Le Canada occupe une excellente position géographique pour entreprendre de telles études. On a découvert dans l'hémisphère nord deux régions montrant des anomalies particulièrement fortes de température de surface de la mer, anomalies liées à des changements dans les conditions atmosphériques sur une échelle de mois ou de quelques années. Ces régions sont situées à l'est de Terre-Neuve et dans le centre du Pacifique Nord. L'effet des températures océaniques chaudes ou froides dans ces régions sur les conditions atmosphériques semble plus prononcé entre 50 et 80° plus loin à l'est. Une autre région clef est située près de l'équateur dans le Pacifique, où des anomalies de température ont été associées à des changements dans le régime climatologique de tout l'hémisphère nord. Une quatrième région jouant un rôle significatif dans la circulation atmosphérique à grande échelle est l'océan Polaire, où la couverture de glace est le facteur contrôlant l'échange thermique avec l'atmosphère. À échelle plus petite mais significative et intéressant le Canada, la baie d'Hudson, le golfe Saint-Laurent et la mer du Labrador sont des masses d'eau suffisamment étendues pour que des changements dans les conditions océaniques entraînant une modification des processus d'échange thermique avec l'atmosphère aient effet significatif sur le climat canadien.

Vers la fin des années 1950, l'Université de la Colombie-Britannique mit sur pied un programme visant à comprendre les processus d'échange de quantité de mouvement, de chaleur et d'autres propriétés physiques à travers la surface de la mer. Plus tard, un groupe fut établi au Laboratoire océanographique de l'Atlantique. Les scientifiques canadiens ont joué un rôle de chef de file dans la recherche sur cet aspect du problème océan–atmosphère, et, sans être étendus, les programmes sont bien développés. On intensifie de plus sur les deux côtes les études des processus dans la couche superficielle et de l'échange avec l'atmosphère. Dans l'océan Polaire, un programme

conjoint États-Unis–Canada (AIDJEX) a entrepris l'étude des propriétés physiques de la glace de mer, de ses interactions avec l'atmosphère et de son rôle dans la circulation et la dynamique des eaux océaniques. Les océanographes canadiens travaillant sur les processus de transfert à travers la limite océan–atmosphère y participent. Il ne se fait pas au Canada, non plus qu'ailleurs, de recherches substantielles dans le but de comprendre le rôle que jouent les processus physiques de l'océan dans les interactions à grande échelle de l'océan et de l'atmosphère, i.e. attaquant le problème du point de vue climatologique. Sans ce type d'étude, on ne peut faire beaucoup de progrès vers la compréhension et la prédiction des aspects climatologiques des océans et de l'atmosphère. Le Canada aurait tort de laisser cet aspect de la recherche se développer ailleurs, car les résultats sont si clairement importants pour lui.

Il y eut un début d'études climatologiques par la section Sciences océaniques et aquatiques, région du Pacifique, et certains travaux sont effectués à l'Université McGill, mais on ne peut y consacrer qu'un minimum d'effort. À l'avenir, ces travaux devront être considérablement élargis et on devra réunir un groupe important de scientifiques. Il faudra s'y mettre assez tôt si nous voulons contribuer au second objectif du GARP et en bénéficier. Au début, ces études devraient être entreprises sur la côte occidentale, car l'océan qui la borde est beaucoup plus sensible aux interactions locales avec l'atmosphère que l'océan qui baigne la côte orientale où se trouvent les courants limitrophes majeurs qui réagissent à la circulation océanique générale. De plus, le Pacifique est l'océan où les phénomènes océaniques à grande échelle ont la répercussion la plus directe sur le climat canadien. Une large part du travail sur le terrain devra être fait en coopération avec les autres pays et, à l'occasion, il sera nécessaire de participer à des programmes sur le terrain à grande échelle. Le programme de la GATE nécessita la présence de 35 navires dans l'Atlantique tropical durant 3 mois. Le Canada y dépêcha le navire météorologique de la côte occidentale, le *Quadra*, avec une équipe d'océanographes et de météorologistes; contribution modeste, mais qui eut quand même une influence sur le programme par l'excellence du travail accompli par le navire canadien. Je voudrais digresser ici pour souligner que, bien que le Canada ne puisse apporter qu'une modeste contribution aux expériences internationales, il peut s'acquitter de ses obligations d'explorer les océans du monde en s'assurant que ses contributions sont significatives par leur haut calibre, ce qui se traduit par un plein support à donner aux meilleurs océanographes qui entreprennent ces travaux.

Océanographie physique et biologie

L'existence de la vie marine dans l'océan est si intimement liée aux conditions du milieu qu'il est impossible de s'attaquer aux problèmes du biologiste simplement du point de vue des renseignements en océanographie physique dont le biologiste peut avoir besoin pour attaquer des problèmes tels que la prévision des pêches. L'étude des relations entre les conditions ambiantes et la vie marine ont, dans le passé, fourni des preuves convaincantes que le mouvement des stocks de poissons vers les bancs de pêche, les voies de migration, la survie des oeufs, des larves et des espèces côtières de poissons sont influencés par des changements dans le milieu océanique et côtier. Avec les outils rudimentaires à leur disposition, les biologistes n'ont pu se procurer que les renseignements en océanographie physique les plus élémentaires, ordinairement la température. Comme résultat, l'état de nos connaissances sur les facteurs ambiants auxquels un système biologique réagit est des plus primitifs. La dernière décennie a vu apparaître des outils beaucoup plus raffinés en océanographie physique, qui peuvent être utilisés pour décrire l'environnement. Il est possible d'installer des batteries de courantomètres pour l'étude des courants sur les frayères; les techniques de mesures routinières des substances nutritives et de la teneur en oxygène ont progressé, de même que les techniques d'études de la turbulence et de la micro-structure de température et de salinité. L'acquisition de ces techniques a permis des études à grande échelle très améliorées, de même que des études sur les effets des phénomènes à petite échelle, tels que la turbulence. La principale répercussion à ce jour a probablement été de mettre en relief le fait que la dépendance du système biologique sur l'environnement *est* complexe et implique des interactions à plusieurs échelles de grandeur et de temps. Le problème n'a pas été simplifié du fait que le biologiste a commencé dernièrement à étudier l'écosystème total, avec les difficultés qui s'y rattachent de relier l'échelle et la succession des événements dans le milieu physique à ceux du système biologique. Le problème qui se pose est de savoir comment employer ces outils et faire progresser notre connaissance de la réaction de la vie marine à un environnement changeant au point où nous pourrons faire des prévisions sur les pêches.

Pour les besoins du présent rapport, je divise les problèmes du biologiste en quatre catégories:

1) Rétrospection sur les événements passés quand il se produit un changement inattendu et significatif dans le système biologique, comme par exemple l'affaissement d'un stock de poissons. Le mieux qu'on puisse faire est d'étudier le plus soigneusement possible les changements qui se sont produits dans l'environnement et de les relier aux changements dans le système biologique. Le succès dépend beaucoup de l'état actuel de nos connaissances. Ce type de projet peut être entrepris effectivement par une équipe multidisciplinaire, ce qu'on fait raisonnablement bien présentement, bien qu'il y ait tendance à séparer trop

tôt l'équipe, avant que soient compris les aspects véritablement interdisciplinaires du problème.

2) Prévision fondée sur une description actuelle de l'environnement. Le déploiement tactique des bateaux de pêche entre dans cette catégorie. Il y a suffisamment d'exemples de déploiements réussis, fondés en particulier sur les températures océaniques, pour démontrer que ceci peut réussir pour certaines espèces, même s'il ne nous est pas toujours possible de suivre de façon continue les conditions de l'océan. Il n'y a pas beaucoup d'effort de fait au Canada dans ce sens, et le progrès a été en grande partie le résultat de travaux d'individus isolés dans les laboratoires de biologie, qui ont utilisé récemment les services du METOC pour obtenir les renseignements océanographiques nécessaires. Un second aspect des prévisions porte sur l'effet des conditions océanographiques présentes sur le recrutement du stock, particulièrement sur la survie au stade larvaire. Il n'est pas surprenant que le biologiste ait été incapable d'étudier cet aspect du recrutement du stock au point de pouvoir préciser quel paramètre océanographique est important et doit être suivi, car dans le passé il n'a eu à sa disposition qu'une description très simple de l'environnement. L'instrumentation en océanographie physique mise au point au cours des 10 dernières années laisse entrevoir la possibilité d'une amélioration considérable des études, dans des régions limitées, sur l'effet des courants, turbulences, structure de densité, apport de salinité et de substances nutritives, par exemple, sur la survie au stade larvaire. Pour réussir, des expériences de ce genre nécessiteront une très étroite collaboration entre le physicien et le biologiste, particulièrement aux stades de planification du programme sur le terrain.

3) Prévision fondée sur la prédiction des changements dans l'environnement. La solution de ces problèmes de prévision à long terme comporte deux aspects. Le premier est une compréhension des facteurs importants du milieu et le second est leur prévision. Le progrès dans ce dernier aspect dépend du succès du physicien à prédire les conditions océaniques, alors que le progrès dans le premier aspect dépend de l'effort consacré à la compréhension des principes fondamentaux de l'écosystème. On ne peut raisonnablement s'attendre à atteindre rapidement le point où l'on pourra prédire les changements dans l'environnement et leurs conséquences biologiques. Certains de ces changements seront causés par l'homme. Dans ces cas, on devra s'efforcer de mettre sur pied des programmes en vue d'en étudier les conséquences physiques et biologiques, car l'étudiant de la nature n'a pas souvent la chance d'entreprendre une expérience contrôlée. Les études sur les interactions entre l'environnement et le système biologique ne sont pas particulièrement bien développées au Canada. Il y a bien une collaboration à court terme entre les physiciens et les biologistes, mais il n'y a pas de groupe important bien défini dont la fonction primaire est l'étude de problèmes interdisciplinaires.

4) Études fondamentales de l'écosystème. Les études des relations fondamentales qui régissent l'écosystème en sont encore au premier stade de développement et représentent quelques-uns des plus grands défis dans le domaine de la mer. Le biologiste qui essaie d'élaborer un modèle statistique quelconque du système se trouve sérieusement désavantagé comparativement au physicien. Ce dernier au moins, lorsqu'il étudie les problèmes complexes impliquant des interactions entre différentes échelles et types de mouvement, se fonde sur des lois de physique fermement établies, quantifiables, et pouvant être exprimées sous une forme mathématique. Qu'un poisson ait besoin de nourriture pour survivre et croître est fondamental, mais essayer de quantifier cet énoncé dans des équations exprimant le rythme de croissance d'une espèce ou un taux de survie pour le plancton implique une multitude de facteurs, tels que considérations de prédateur/proie et disponibilité de la nourriture, et produit des relations mathématiques qui ne tiennent que faiblement. L'élaboration de modèles de l'écosystème entier à partir de telles relations est une tâche formidable. Par ailleurs, ce sont ces relations que le biologiste essaie de trouver, et une partie de sa recherche englobe le milieu physique. Il est douteux que l'on puisse accomplir des progrès rapides si la recherche dans ce domaine est laissée à une collaboration occasionnelle entre océanographes physiciens et biologistes, ou à des biologistes travaillant seuls et faisant appel au physicien pour certains renseignements de base sur l'environnement. Cependant, c'est la situation qui existe en général au Canada.

Services océanographiques

Le succès de nos programmes de recherches devrait se refléter dans l'aptitude des centres établis à fournir à l'industrie et aux organismes gouvernementaux certains types de renseignements. Il y a trois de ces centres au Canada : le Service de données sur l'environnement marin, situé à Ottawa, et les deux Centres météorologiques et océanographiques des Forces canadiennes, l'un situé à Halifax et l'autre à Esquimalt.

Le Service de données sur l'environnement marin sert d'archives nationales et de centre d'information pour les données océanographiques cueillies dans les eaux canadiennes et les mers avoisinantes, est responsable de la prévision des marées dans les régions côtières et entreprend des études climatologiques à partir des données accumulées dans la banque de données ou, dans certains cas, à la suite de travaux sur le terrain sous la direction du SDEM. Ce Service est une extension du Centre canadien de données océanographiques, établi en 1962 avec l'objectif limité

d'entreposer les données. L'expansion du Centre pour inclure des études climatologiques à l'intention de divers clients a considérablement élargi et renforcé les services rendus. Les centres chargés seulement de maintenir des archives tendent à devenir stériles, et les techniques de recouvrement des données à devenir archaïques, au mécontement à la fois du personnel du centre et de ceux qui veulent utiliser les données. Les méthodes de manipulation des données utilisées par le SDEM sont parmi les plus modernes au monde, et le SDEM a joué un rôle significatif dans le développement de facilités d'échange de données entre les centres nationaux du monde. Présentement, l'équilibre entre le SDEM et le reste de la recherche et des services océanographiques semble à peu près juste et devrait être maintenu à mesure que le programme océanographique du pays s'élargit.

Le METOC-FC à Halifax est le plus développé des deux services du METOC. Son personnel comprend un océanographe et neuf météorologistes. Le METOC-FC à Esquimalt comprend quatre météorologistes et aucun océanographe. Ces services fournissent des prévisions météorologiques et océanographiques pour les opérations navales et autres activités maritimes. Dans les deux centres, les principaux produits océanographiques sont des cartes synoptiques de la température de surface, de la profondeur de la couche mixte et des conditions de vague dans le voisinage des deux côtes. Ces cartes sont transmises sur fac-similé ou par radio. Elles sont dressées à la main et sont fondées sur les données fournies par des navires d'occasion. Les données sont transmises à la côte par radio. Ces centres en sont à un stade de développement primitif. Les ressources mises à leur disposition sont tellement petites qu'il leur est à peu près impossible d'expérimenter et de développer des techniques permettant de préparer de meilleures cartes synoptiques des paramètres de l'océan, et de recruter un personnel ayant la formation nécessaire pour étudier les possibilités de prévision. Les Forces maritimes canadiennes ont été le principal usager de ces services, et le développement de ces derniers en relation avec les opérations navales a été approprié. Sans l'intérêt des FMC, ces services ne se seraient jamais développés. Une déficience dans le développement des services pour fins militaires, avec centres situés dans les chantiers navals, a été l'absence de toute contribution de programmes de recherches en océanographie pour améliorer ces centres. Dans le passé, cette déficience n'a pas été trop sérieuse, car on ne pouvait pas faire grand-chose pour améliorer les cartes vu la rareté des données disponibles. De plus, les connaissances des océans n'étaient pas suffisamment avancées pour permettre autre chose que la construction de cartes d'une manière empirique. On aurait probablement pu améliorer le système, mais ces améliorations n'auraient été que marginales. Par ailleurs, songeant à l'avenir, on ne peut envisager les opérations des centres avec autant de sérénité. Plusieurs programmes expérimentaux, en particulier certains programmes internationaux, visent des problèmes qui, une fois résolus, entraîneront une amélioration de la description des océans sur base synoptique et prédictrice. Il y a également la perspective d'améliorer considérablement la cueillette des données à l'aide de satellites, de bouées fixes et dérivantes, et de navires en marche. À long terme, l'expression pratique de la recherche sur la climatologie et les modèles océaniques prendra la forme d'un service qui, devant une activité accrue dans l'océan, aura une clientèle diversifiée. Les développements de la recherche et les perspectives futures de services grandement améliorés militent tous deux en faveur de l'établissement de centres sur les deux côtes afin de fournir des services océanographiques à des fins autres que militaires. Les centres devront avoir accès à des ordinateurs et posséder un personnel dont la formation en océanographie physique et en mathématiques est au moins au niveau de la Maîtrise.

Un quatrième service important, sans être strictement océanographique, est celui de la prévision des glaces par le Centre de glaces (ME) à Ottawa. Le Centre de glaces prépare des cartes de distribution des glaces depuis la mer de Beaufort jusqu'au golfe Saint-Laurent. Ces cartes sont transmises par fac-similé radio. Le Centre prépare également des estimés de dates de formation de la glace. La prévision du mouvement des champs de glace présuppose une connaissance du champ du vent et des courants océaniques. Le champ du vent, qui a la plus grande influence sur le mouvement de la glace, est établi à partir des prévisions météorologiques, mais il n'y a pas de données disponibles sur le champ des courants au moment des prévisions, et ces dernières sont établies sur la base des systèmes climatologiques du moment dans la région des prévisions. Il n'est pas possible, ni maintenant ni dans un avenir prochain, de fournir sur base chronologique réelle des renseignements sur les régimes de courant à l'échelle requise. Il faudra attendre que soient développés de meilleurs systèmes que ceux que nous avons présentement pour le contrôle continu de l'océan. Notre aptitude à prédire le mouvement des glaces sur les plateaux continentaux serait toutefois rehaussée par une meilleure connaissance des systèmes de courant dans la mer de Beaufort, le long de la côte du Labrador, dans la baie et le détroit d'Hudson, et dans le bassin Foxe.

Il n'y a pas pour le moment besoin urgent d'informations courantes dans l'archipel, car les navires ont quitté la région avant le gel. Le ministère des Transports prévoit cependant le développement de brise-glaces capables d'opérer en hiver, et ceci nécessitera des prévisions à l'année longue des conditions de pression dans la banquise. On est d'avis que la poussée du champ du vent est le facteur clef. Les prévisions du temps de formation des glaces requièrent une con-

naissance des conditions de la mer à la fin de l'automne et des conditions atmosphériques à mesure que l'hiver avance. Le Laboratoire océanographique de l'Atlantique fournit chaque année en novembre les données de température et de salinité nécessaires pour le golfe Saint-Laurent. Si l'on veut étendre ces prévisions à la mer de Beaufort, il faudra fournir des données semblables. La condition préalable la plus importante à la prédiction des glaces se situe dans les régions qui recouvre les plateaux continentaux mentionnés plus haut, avec en plus l'une des régions les plus importantes, le golfe Saint-Laurent. C'est dans ces régions que le programme océanographique actuel est le plus faible et où le système des courants est très peu compris, sauf dans ses très grandes lignes.

Conclusions et recommandations

Ce qui nous a frappé le plus au cours de discussions avec les océanographes et autres individus intéressés aux océans est le degré auquel on utilise notre connaissance des caractères physiques de l'océan et les données existantes. Si l'on avait demandé à un scientifique, il y a 15 ans, quel usage on fait de l'océanographie physique, il aurait pu répondre qu'elle servait surtout de support aux scientifiques des autres disciplines. On aurait de plus probablement mentionné le biologiste intéressé aux pêches et le physicien travaillant sur des problèmes de défense maritime comme étant les scientifiques les plus intéressés. Tout ceci a changé. Les services et laboratoires océanographiques ont de la difficulté à répondre à toutes les demandes de conseils, données et études spéciales de la part de presque tous ceux qui sont associés à l'océan. La gamme s'étend des municipalités qui veulent savoir où rejeter les eaux usées aux hommes politiques impliqués dans les négotiations d'accords internationaux sur l'utilisation de l'océan; et d'ingénieurs développant des sous-marins miniatures pour l'inspection des câbles de télécommunication sous-marins aux opérateurs de navigation transatlantique qui sont intéressés à la sûreté de la cargaison et au temps de traversée. Il n'est pas facile de saisir la signification de tout ce qui est arrivé et de ce qui est requis en terme de gestion des océans, car à l'heure actuelle les problèmes surgissent pièce à pièce, tous urgents aux yeux de celui qui a le problème. Il découle de ce rapport que l'avenir verra se développer des services océanographiques de grande envergure. Certains de ces services s'occuperont de fournir des descriptions et prévisions à grande échelle, d'autres s'intéresseront aux conditions locales, en particulier dans la région côtière, où la forme de la frontière physique est un facteur déterminant de l'océanographie locale.

Il nous faut maintenant considérer l'ampleur du problème auquel le Canada a à faire face s'il veut gérer les ressources de ses océans. Toutes les régions côtières canadiennes, les plateaux continentaux et les eaux profondes sont impliqués. Il n'y a pas lieu de spéculer sur l'avenir et de se demander s'il se produira quelque activité et, dans l'affirmative, quel type d'activité. Nous sommes déjà impliqués dans la solution de problèmes pratiques dans les régions lointaines de l'Arctique ou dans les mers profondes. Ce que je veux dire ici c'est que le besoin d'un programme océanographique embrassant tous les plateaux continentaux et les régions côtières, y compris la haute mer, a été démontré par la réalité des problèmes pratiques auxquels nous avons à faire face aujourd'hui. Nous ne pouvons isoler les aspects de l'océanographie physique et les mettre de côté sous prétexte qu'ils n'ont qu'une vague application pour l'avenir. Si nous considérons la diversité des conditions océanographiques qui entourent le Canada et dont nous devons tenir compte, viz. la longueur des côtes et la superficie des plateaux continentaux, et le fait qu'une océanographie à échelle globale est impliquée, nous ne pouvons nous soustraire au défi que le Canada, en terme de gestion, a à résoudre une aussi grande variété de problèmes océanographiques que tout autre pays du monde.

Recherches fondamentales

Le Canada devrait maintenir un programme versatile de recherches et devrait former à long terme des scientifiques bien au fait de tous les aspects de l'océanographie. De temps à autre, l'équilibre passera d'un aspect à l'autre, ce qui est normal, selon les occasions de progrès ou les problèmes pratiques qui se présentent pour les scientifiques. Il ne serait pas à l'avantage du Canada de restreindre son programme à deux ou trois champs spécialisés. Le programme de recherches fondamentales actuel ne requiert qu'une modeste expansion pour fournir à la fois un équilibre raisonnable et un minimum de scientifiques dans chaque secteur pour réaliser des progrès significatifs.

Trois aspects de la recherche fondamentale doivent retenir l'attention, parce qu'ils offrent un potentiel considérable pour l'avancement de la science océanographique, avec d'importantes applications pour la gestion des ressources.

1. *L'océanographie physique des plateaux continentaux et des océans avoisinants* — De toutes les régions bordant la côte canadienne, les eaux des plateaux continentaux sont celles qui ont été le moins bien étudiées. Ce sont sur les bancs et le long des marges de ces plateaux que se pratiquent les principales pêcheries, et sur ces plateaux et pentes adjacentes que l'exploration pétrolière se fera. La zone économique de 200 milles proposée à la Conférence sur le droit de la mer à Caracas couvre une grande partie de la superficie des plateaux et entraîne pour le Canada la responsabilité de gérer l'exploitation

des ressources. Il n'y a pas à l'heure actuelle de programme formel d'établi qui fournira les connaissances océanographiques requises pour une telle gestion. Du point de vue scientifique, les plateaux ont été à peine touchés, et nous avons maintenant l'occasion d'entreprendre d'excitantes études expérimentales et théoriques.

2. *Études climatologiques de l'océan et développement de modèles numériques* — On a accordé peu d'attention au Canada à l'étude des aspects climatologiques des océans et au développement de modèles numériques. Ces domaines prennent de l'importance et offrent des perspectives de progrès majeurs dans notre compréhension des océans. Ces études sont également des plus prometteuses en ce qui a trait à notre aptitude à faire des prévisions tant pour les océans que pour l'atmosphère. Ce ne sont pas seulement les principaux océans qui sont impliqués, mais également les masses d'eau plus petites, le golfe Saint-Laurent, la baie d'Hudson, où les échanges avec l'atmosphère peuvent influencer le climat.

3. *Océanographie des pêches* — Les études visant à comprendre les interactions entre l'environnement et la biologie marine, et l'application de ces connaissances aux pêches laissent à désirer et sont sujettes à beaucoup d'amélioration. Les projets à court terme pouvant être réalisés en 1 ou 2 années et comportant une information océanographique de base pour une étude surtout biologique reçoivent un appui adéquat. Par ailleurs, on ne connaît pas d'équipes, même de deux ou trois scientifiques, qui attaquent ces problèmes à long terme. Une recommandation sur la façon d'y remédier n'entre pas dans les cadres de ce rapport, car ce problème devrait être considéré dans le contexte de la biologie et de la gestion des pêches. Nous soulignons toutefois que ces études à long terme sont essentielles si les résultats de la recherche en océanographie physique doivent être appliqués aux pêches.

Les autres parties du programme de recherches ont progressé au point que nous possédons un minimum de connaissances à appliquer aux divers problèmes qui se posent à mesure qu'augmentent l'usage et la manipulation des océans et des eaux côtières. L'océanographie côtière absorbe environ 50% de l'effort, mais ceci est en accord avec la diversité des problèmes qui surgissent dans les régions côtières à l'heure présente. Les études des processus de déposition des sédiments et des processus de la côte ne sont pas aussi avancées qu'elles le devraient, mais il y a activité accrue dans ce domaine, particulièrement avec le projet de l'Institut national de la recherche scientifique, section océanologie, Université du Québec à Rimouski, d'entreprendre des études dans ce sens. Les études océanographiques dans l'archipel Canadien et autres régions de l'Arctique ne sont pas très développées, mais progressent à un rythme beaucoup plus rapide que jadis. La recommandation portant sur un programme d'études des plateaux continentaux comporte une augmentation de l'activité océanographique dans l'Arctique.

Il est inquiétant de constater que l'expansion de l'océanographie physique qui se produisit au cours des années 1960 s'est ralentie et est demeurée stationnaire à une époque où la demande pour les services de l'océanographe physicien a augmenté de façon si remarquable et, selon toute évidence, continuera d'augmenter. L'expansion des années soixante visait tout d'abord à former des jeunes scientifiques et à développer des laboratoires au Canada dans cette branche de la science océanique qui fait de rapides progrès. L'océanographie physique a dépassé le stade où elle peut faire de grands progrès par l'exploration, la cartographie et l'interprétation des caractéristiques océaniques les plus faciles à mesurer, telles que la température et la salinité. L'océanographie physique moderne requiert un mélange de scientifiques versés dans les mathématiques et les principes physiques de la mécanique des fluides, et capables de poursuivre des études expérimentales pour lesquelles il leur faut développer des techniques nouvelles et raffinées. Le programme des années 1960 a réussi à développer ce type de compétence au point que, sous certains aspects de l'océanographie physique, les scientifiques canadiens sont parmi les meilleurs au monde. Le nombre total d'océanographes physiciens n'est cependant que de 86 et c'est à ce groupe qu'incombe la tâche de continuer à faire progresser nos connaissances des océans, à entreprendre des relevés et fournir des services, et à administrer le programme entier.

Il n'existe pas de groupe périphérique dans l'industrie, les organismes gouvernementaux ou les laboratoires de biologie avec la formation nécessaire pour absorber la demande croissante de services. Le résultat de ce plafonnement de l'effort total ne peut être qu'une érosion graduelle de la compétence à mesure qu'un nombre de plus en plus grand de scientifiques ont à s'occuper de relevés, de comités, et ainsi de suite, ne leur laissant pas suffisamment de temps pour se perfectionner eux-mêmes ou leur recherche. Comme individus, les scientifiques ne devraient pas se tenir tout à fait à l'écart des problèmes pratiques; de fait, ils doivent être impliqués si leurs connaissances et compétence doivent être utilisées. À l'heure actuelle cependant, le degré d'implication est tel qu'il y a sérieux danger de détruire cette même compétence scientifique acquise graduellement au prix de tant d'efforts et de dépenses. Une solution est de former plus de scientifiques et d'augmenter de deux à trois fois l'effort global de *recherches* dans les universités et les laboratoires gouvernementaux, de façon à pouvoir répartir la charge. Le point de vue du présent rapport est que ce n'est pas la bonne direction à prendre parce que, à long terme, on croit que l'utili-

sation de l'océan augmentera au point qu'il faudra développer une forme quelconque de *services* océanographiques, et il faudrait commencer à les développer.

Océanographie appliquée

La section précédente a souligné le fait que la charge entière des relevés et services en océanographie physique retombent sur les universités et les laboratoires de recherches gouvernementaux, et qu'il faudrait trouver des moyens de répondre à ces besoins pratiques. Ces services pourraient se développer suivant trois catégories :

a) Il y aura toujours un besoin de maintenir et de développer un service d'archives nationales et des facilités de recouvrement des données sous diverses formes en réponse aux demandes de divers clients. Le présent service de données sur l'environnement marin répond bien à ce besoin et devrait continuer de le faire.

b) Il existe et existera un besoin de produire des cartes synoptiques à grande échelle et des prévisions pour distribution ou transmission générale. Le réseau requis pour fournir ces services sera étendu, même à l'échelle mondiale dans certains cas. La manipulation et le traitement des données seront faits en grande partie par ordinateur.

c) Le besoin de relevés dans des régions limités, en particulier dans la zone côtière, continuera de se faire sentir, en même temps que le besoin d'entreprendre des évaluations d'impact sur le milieu. Bien des études à court terme et évaluations de cette nature pourraient être réalisées par l'industrie si l'on pouvait développer dans le secteur privé une aptitude à entreprendre des relevés. La politique d'impartition permet d'y arriver, et les laboratoires océanographiques fédéraux ont déjà commencé à explorer les possibilités de faire effectuer des travaux de recherches à forfait. Le secteur privé aura besoin de temps, au moins encore 5 ans, pour s'assurer les services d'océanographes qualifiés. Durant cette période, il aura besoin d'être appuyé sous forme de contrats par le gouvernement. En même temps, les laboratoires fédéraux peuvent adopter la politique de se retirer graduellement du domaine des « relevés océaniques ». Rien n'empêche l'industrie de servir l'industrie, quand cette dernière est le client, les organismes fédéraux et provinciaux s'assurant que les intérêts nationaux sont bien servis dans le cas où les travaux se rapportent à l'évaluation et à la protection du milieu.

Coûts

L'objectif du présent rapport n'est pas de faire une étude détaillée des coûts du programme océanographique de l'avenir. Cependant, on peut donner un estimé du coût comme suit :

Le programme de recherches fondamentales serait en assez bonne posture s'il se développait au taux de 7% durant les 5 prochaines années. Ceci représenterait une addition d'environ 35 chercheurs à l'effort total. Selon le budget du Laboratoire océanographique de l'Atlantique, le maintien d'un scientifique, y compris support technique, équipement et temps de navire est de $200 000. L'augmentation dans le budget fédéral après 5 ans serait donc de $7 000 000; de ce montant, une partie devrait être versée aux universités, une partie aux laboratoires fédéraux et une partie à l'industrie, par l'intermédiaire des laboratoires fédéraux, pour défrayer les coûts de la recherche fondamentale effectuée sous contrat par le secteur privé à la demande du gouvernement.

Il devrait y avoir également une augmentation des sommes dépensées par l'industrie pour faire l'évaluation de l'environnement. Il est difficile de préciser un montant, étant donné que la demande pour ces services continue d'augmenter.

Au début des années 1980, il sera nécessaire de financer des centres sur les deux côtés afin de grouper ensemble les services de prévision existants et de fournir les moyens de développer davantage ces services. Le coût initial, comprenant le personnel, ordinateurs et espace sera d'environ 40 millions de dollars. Deux puissants ordinateurs absorberont la majeure partie de ce montant. Ce montant paraît énorme, mais peut être compensé par les autres usagers des ordinateurs dans la région.

Comme on l'a mentionné plus haut, ces chiffres sont approximatifs, mais on croit qu'ils donnent une idée de l'ordre de grandeur selon lequel on devra augmenter l'effort.

Recommandations

1) Le programme canadien devrait être élargi pour inclure un effort substantiel en climatologie de l'océan. Au départ, on devrait établir un groupe sur la côte occidentale chargé d'étudier les problèmes climatologiques.

2) Un programme de modèles numériques de la circulation océanique devrait être mis en marche sur la côte orientale.

3) On devrait fournir du personnel et des fonds pour un programme d'études océanographiques sur les plateaux continentaux des côtes occidentale et orientale, y compris la mer de Beaufort et les régions Labrador–détroit d'Hudson–baie Baffin.

4) Des centres non militaires devraient être établis sur chaque côte dans le but de fournir les services communément utilisés de prévisions océanographiques. On devrait s'y mettre dès maintenant.

5) Le curriculum futur des départements universitaires ou des instituts d'océanographie devrait incorporer des études et une formation couvrant les modèles numériques et la climatologie océanique.

6) Les universités devront établir un programme au niveau de la Maîtrise afin de répondre au besoin de l'industrie et des organismes fédéraux en personnel pour les services d'évaluation et de prédiction de l'environnement.

7) Le personnel et le financement des universités en océanographie physique devront être augmentés afin de leur permettre de donner suite aux recommandations 5 et 6.

Remerciements

Cette étude n'aurait pu être complétée sans l'aide de plusieurs océanographes physiciens canadiens qui ont généreusement contribué leur temps à discuter de leurs travaux et de l'avenir de l'océanographie physique.

Je désire remercier tout particulièrement MM. W. L. Ford, G. T. Needler, G. L. Pickard, S. Pond et J. C. Swallow qui ont lu le manuscrit soigneusement et ont fait plusieurs commentaires utiles.